



TUGAS AKHIR - TF 141581

**ANALISA RESPON GERAK PONTON
DAN PENDULUM VERTIKAL
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT- SISTEM BANDUL
(PLTGL-SB)**

**YULIA SAFITRI
NRP. 2412 100 082**

**Dosen Pembimbing
Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TF141581

RESPONSE OF PONTOON AND PENDULUM MOTION AT OCEAN WAVE POWER PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM

YULIA SAFITRI
NRP. 2412 100 082

Supervisor
Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA RESPON GERAK PONTON DAN PENDULUM VERTIKAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT- SISTEM BANDUL (PLTGL- SB)

TUGAS AKHIR

Oleh:

YULIA SAFITRI
NRP. 2412 100 082

Surabaya, Januari 2016
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
NIP. 19771127 200212 1 002

Pembimbing II



Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.
NIP. 19880710 201504 2 001



LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA RESPON GERAK PONTON DAN PENDULUM VERTIKAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT- SISTEM BANDUL (PLTGL- SB)

TUGAS AKHIR


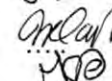



Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

YULIA SAFITRI

NRP 2412 100 082

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. |  | (Pembimbing I) |
| 2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc. |  | (Pembimbing II) |
| 3. Ir. Jerri Susatio, M.T. |  | (Penguji I) |
| 4. Andi Rahmadiansah, S.T., M.T. |  | (Penguji II) |
| 5. Bagus Tri Atmaja, S.T., M.T. |  | (Penguji III) |

**SURABAYA,
JANUARI 2016**

ANALISA RESPON GERAK PONTON DAN PENDULUM VERTIKAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT- SISTEM BANDUL (PLTGL- SB)

Nama : Yulia Safitri
NRP : 2412100082
Jurusan : Teknik Fisika, FTI - ITS
Pembimbing I : Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
Pembimbing II : Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstrak

Teknologi konversi energi yang berasal dari energi gelombang laut sudah banyak dikembangkan, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandul (PLTGL-SB). PLTGL disusun dari sebuah ponton yang dikenai gaya eksitasi gelombang laut yang akan menggerakkan pendulum diatasnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa bentuk ponton terbaik untuk PLTGL- SB dan mengetahui simpangan terbesar yang dihasilkan pendulum vertikal akibat gerakan ponton. Bentuk ponton yang diteliti adalah ponton yang terdiri dari silinder besar ditengah dan terdapat dua buah jukung disebelah kanan dan kiri, seperti kapal trimaran. Variasi yang dibuat pada penelitian ini terdiri dari variasi panjang dan tinggi jukung, tinggi sarat air, periode gelombang yang datang, massa dan panjang lengan pendulum. Bentuk ponton terbaik ditentukan dengan mensimulasikan bentuk ponton dengan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) menggunakan Ansys Aqwa. Simpangan pendulum didapat dengan memodelkan matematik dua *degree of freedom* ponton (*roll*) dan pendulum. Berdasarkan grafik *Response Amplitude Operator* (RAO) bentuk ponton yang terbaik untuk PLTGL-SB adalah ponton dengan sarat $\frac{2}{3}$ diameter silinder besar, tinggi jukung 1.5 cm, panjang jukung 41.5 cm. Berdasarkan hasil model matematik simpangan terbesar pendulum dihasilkan jika ponton diletakkan pada periode 0.8 s, dengan massa dan panjang lengan pendulum 19.9 g dan 10.6 cm

Kata kunci: PLTGL-SB, Ansys Aqwa, RAO, Simpangan Pendulum

RESPONSE OF PONTOON AND PENDULUM MOTION AT OCEAN WAVE POWER PLANT BASED ON PENDULUM SYSTEM

Name : Yulia Safitri
NRP : 2412100082
Departement : Engineering Physics – Faculty of Industrial
Technology - ITS
Supervisor I : Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T.
Supervisor II : Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstract

Energy conversion technology derived from ocean wave energy has been developed, one of them is the Power Wave sea-Pendulum System (PLTGL-SB). PLTGL composed of a pontoon which is subjected to the excitation force of ocean waves and will move the pendulum on the top of pontoon. This study aims to analyze the best shape for PLTGL- SB's pontoon and determine the largest deviation generated due to the movement of the pendulum vertical pontoon. Pontoon shapes studied are pontoon consisting of a large cylinder in the middle and there are two boats on the right and left, like a trimaran ship. Variations were made in this study consisted of variations of length and height boats, the draft height,, wave period, the mass and the length of the pendulum arm. Best pontoon shape is determined by simulating the shape of a pontoon with Computational Fluid Dynamic (CFD) using Ansys AQWA. Pendulum deviation obtained by mathematical modeling pontoon two degree of freedom (roll) and pendulum. Based on the chart RAO pontoon shape is best for PLTGL-SB is a pontoon with a 2/3 full large cylinder diameter, 1.5 cm height boats, catamarans length of 41.5 cm. Based on the results of a mathematical model of the largest deviation of the pendulum is generated when the pontoon is placed in the period of 0.8 s, with a mass and pendulum arm length are 19.9 g and 10.6 cm

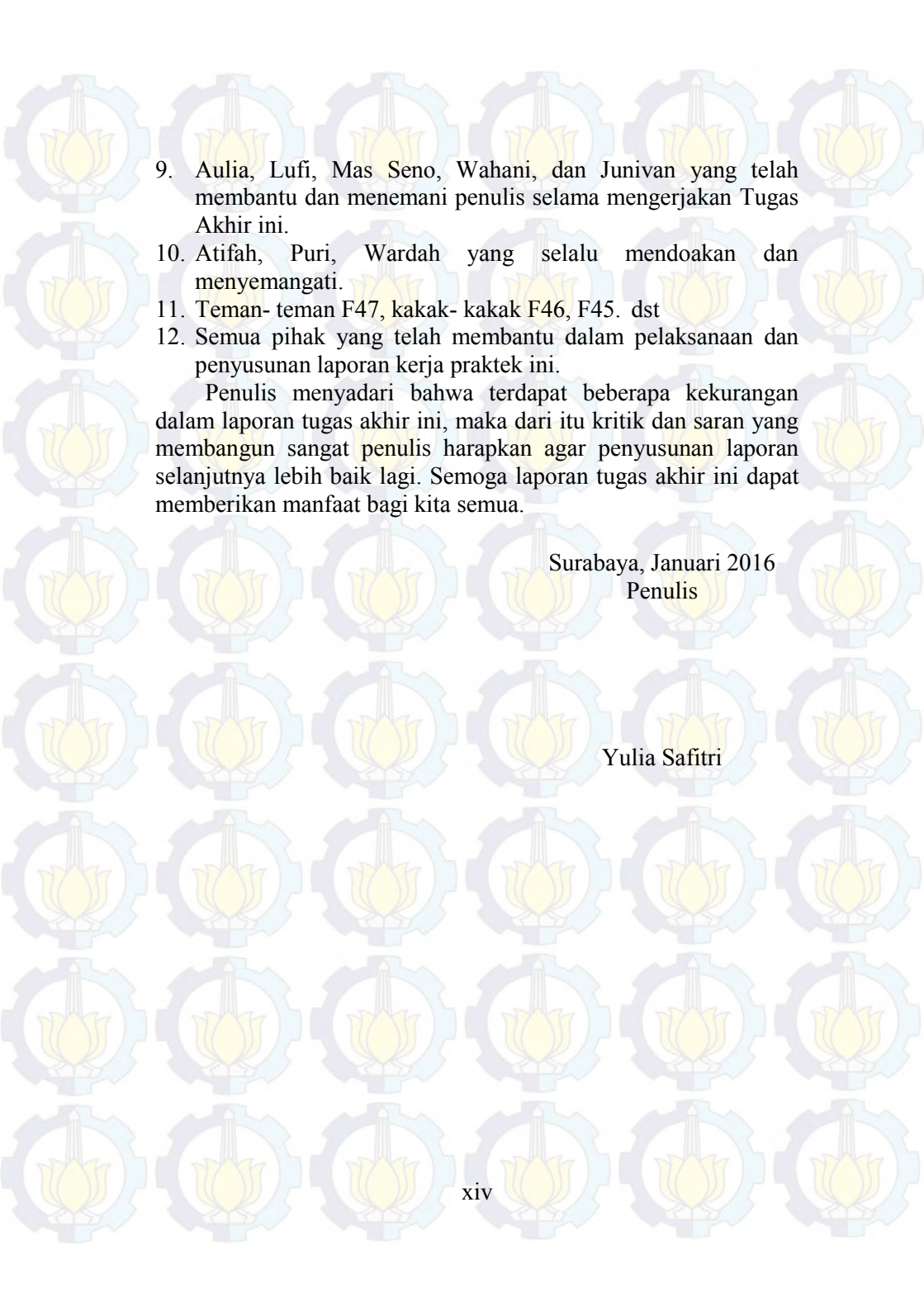
Keywords : ***PLTGL-SB, Ansys Aqwa, RAO, Pendulum Deviation***

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur senantiasa Saya panjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Agung dan Maha Bijaksana. Atas berkah, petunjuk, dan karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Analisa Respon Gerak Ponton dan Pendulum Vertikal pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul (PLTGL-SB)**. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai pertanggungjawaban penulis selama melaksanakan tugas akhir.

Selama melaksanakan dan menyusun laporan tugas akhir ini, penulis telah mendapat banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua, Uni, dan keluarga besar yang selalu memberikan do'a, dukungan, dan perhatiannya kepada penulis.
2. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, ST. MT dan Ibu Nurlaila Hamidah, ST. M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu mengarahkan penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, ST, MT selaku dosen pembimbing tugas akhir yang mengarahkan penulis dan memberikan semangat dalam pengerjaan tugas akhir.
4. Bapak Ir. Jerri Sutasio, MT selaku dosen pembimbing tugas akhir yang mengarahkan penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
5. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si. Ph.D selaku ketua Jurusan Teknik Fisika FTI ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmunya dengan ikhlas sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah sampai tugas akhir ini.
7. Rodhiatul Isnaini sebagai rekan tugas akhir yang telah berjuang bersama- sama terselesaikannya tugas akhir ini.
8. Keluarga besar fisis ceria yang telah menemani penulis dan berbagi keceriaan saat pengerjaan tugas akhir.

- 
9. Aulia, Lufi, Mas Seno, Wahani, dan Junivan yang telah membantu dan menemani penulis selama mengerjakan Tugas Akhir ini.
 10. Atifah, Puri, Wardah yang selalu mendoakan dan menyemangati.
 11. Teman-teman F47, kakak-kakak F46, F45. dst
 12. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan kerja praktek ini.

Penulis menyadari bahwa terdapat beberapa kekurangan dalam laporan tugas akhir ini, maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan agar penyusunan laporan selanjutnya lebih baik lagi. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Surabaya, Januari 2016
Penulis

Yulia Safitri

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix

BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Laporan.....	4
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Teori Dasar Gelombang Laut	7
2.2 Gelombang Reguler	8
2.3 Teori Dasar Gerakan Bangunan Laut Akibat Beban Gelombang.....	9
2.4 RAO (Response Amplitude Operator).....	10
2.5 Teori Stabilitas.....	12
2.6 Parameter dalam Stabilitas	14
2.7 Segitiga Stabilitas	16
2.8 Keseimbangan	17
2.9 Konsep Getaran	18
2.10 Gerak Harmonik Sederhana	19
2.11 Koordinat Umum dan Persamaan Lagrange	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25

3.2 Desain PLTGL.....	28
3.3 Simulasi CFD Poton	31
3.3.1 Geometri Ponton	31
3.3.2 Model Ponton.....	31
3.3.3 Meshing	32
3.3.4 <i>Pre- Processing</i>	33
3.3.5 <i>Post Processing</i>	34
3.4 Pemodelan Matematis Gerak Ponton dan Pendulum	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Validasi Hasil Simulasi.....	39
4.2 Respon Amplitude Operator (RAO) Ponton.....	40
4.2.1 Respon Ponton dengan Variasi Sarat Air.....	40
4.2.2 Respon Ponton dengan Variasi Panjang Jukung.....	43
4.3 Analisa Gerakan Pendulum	47
4.3.1 Gerak Pendulum Variasi massa	47
4.3.2 Gerak Pendulum Variasi Panjang Lengan Pendulum	48
4.4 Pembahasan	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran	55
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Formasi Gelombang Laut.....	7
Gambar 2. 2 Spektrum Tunggal Karakteristik Gelombang Reguler	8
Gambar 2. 3 Gelombang Acak atau Irregular.....	9
Gambar 2. 4 <i>Six Degree of Freedom</i> (SDOF) pada Kapal.....	10
Gambar 2. 5 Bentuk Umum Grafik Respon Gerakan Bangunan Apung.....	11
Gambar 2. 6 Tiga Kondisi Kestabilan	12
Gambar 2. 7 Contoh Titik Berat Sebuah Benda Terapung	13
Gambar 2. 8 Letak Titik Berat di Air.....	13
Gambar 2. 9 Letak Titik <i>Metacenter</i>	14
Gambar 2. 10 Parameter yang di gunakan dalam Perhitungan Stabilitas.....	15
Gambar 2. 11 Metasenter dan Jari- jari metasenter	16
Gambar 2. 12 Titik Stabilitas Kapal	16
Gambar 2. 13 Tiga Kondisi Kesetimbangan.....	17
Gambar 2. 14 Ilustrasi Gerak Harmonik Sederhana	19
Gambar 2. 15 Gaya yang Bekerja pada Pendulum	20
Gambar 2. 16 Sistem dengan Pendulum Bertingkat	22
Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penelitian.....	26
Gambar 3.2 Gambar PLTGL-SB 3D	31
Gambar 3. 3 Gambar PLTGL-SB Tampak Depan.....	31
Gambar 3. 4 Hasil Meshing Ponton.....	33
Gambar 3. 6 Hasil Simulasi dengan Gelombang Datang	34
Gambar 3. 7 Gambar Ponton Silinder dan Pendulum Tampak Depan	35
Gambar 4. 1 <i>Roll</i> RAO Variasi Ketinggian Sarat Air.....	41
Gambar 4. 2 <i>Heave</i> RAO Variasi Ketinggian Sarat Air	42
Gambar 4. 3 <i>Pitch</i> RAO Variasi Ketinggian Sarat Air	42
Gambar 4. 4 Gerakan Ponton Variasi Panjang Jukung pada Sarat $\frac{1}{2}$ D. (a) <i>Roll</i> (b) <i>Heave</i> (c) <i>Pitch</i>	44
Gambar 4. 5 Gerakan Ponton Variasi Panjang Jukung pada Sarat $\frac{2}{3}$ D. (a) <i>Roll</i> (b) <i>Heave</i> (c) <i>Pitch</i>	44
Gambar 4.6 Respon Pendulum Variasi Massa.....	46

Gambar 4. 7 Respon Pendulum Sarat 1/2 Variasi Lengan
Pendulum dengan Periode Gelombang (a) 0.4 s. (b)
0.6 s. (c) 0.8 s.50

Gambar 4. 8 Respon Pendulum Sarat 2/3 Variasi Lengan
Pendulum dengan Periode Gelombang (a) 0.4 s. (b)
0.6 s. (c) 0.8 s.52

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian Ponton	25
Tabel 3. 2 Variasi Penelitian Pendulum	26
Tabel 3. 3 Variasi Penelitian Pendulum	27
Tabel 3. 4 Perhitungan Ponton.....	28
Tabel 4. 1 Validasi Hasil Simulasi	37

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Direktorat Jendral (Ditjen) Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) tahun 2013, energi hidro (laut) merupakan salah satu sektor energi baru terbarukan yang potensial di Indonesia. Hal ini disebabkan Indonesia memiliki luas laut tiga kali lebih luas dari daratannya, sebesar 3.544.743,9 km². Sumber energi laut sendiri terdiri dari tiga macam, yaitu energi panas laut, energi pasang surut, dan energi gelombang laut.

Energi gelombang laut sudah mulai dipelajari lebih dari 30 tahun (Hongda Shi, 2014). Saat ini, teknologi konversi energi yang berasal dari energi gelombang laut sudah banyak dikembangkan, seperti *oscillating water coloum*, pendulum sistem yang di pasang di *shoreline*, *offshore wave dragon system*, *shelter duck system*, dan *plamis wave converter* (Rodrigues, 2010).

Device energi gelombang laut seperti *Oscillating Water Columns* (OWC) mengubah pergerakan naik turunnya gelombang pada kolom silinder udara untuk menghasilkan udara bertekanan yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator listrik. OWC memiliki keuntungan karena hanya sedikit bagian pada OWC yang terendam air. Teknologi OWC memiliki kekurangan dibatasi oleh kedalaman air oleh karena itu tidak memungkinkan untuk diinstallasi pada laut dalam. Studi kelayakan untuk OWC sudah dilakukan oleh Shi et al (Hongda Shi, 2014) dengan memodelkan udara untuk mengoptimalkan skala ruang dan tekanan turbin sehingga mendapatkan efisiensi daya listrik yang besar (Hongda Shi, 2014). Teknologi yang lain diciptakan untuk mengatasi terbatasnya teknologi OWC yang tidak dapat diinstallasi pada laut dalam adalah *floating dish*. *Floating dish* pertama kali diinstallasi oleh Ocean University of China. *Floating dish* dibuat terdiri dari bagian bawah air yaitu piston sebagai bagian yang menangkap gelombang laut dan bagian atas yaitu generator untuk menkonversikan gerak piston

menjadi energi listrik (KS. Choi, 2012). *Floating dish* memanfaatkan gerakan *Heave* dari gelombang laut. Teknologi yang juga menggunakan gerakan piston untuk menangkap gelombang laut seperti, pelamis, *Duck and Eagle converter* yang dikembangkan oleh Guangdong Institution of Energy Conversion, China (Hongda Shi, 2014).

Di Indonesia, teknologi OWC dimulai pada tahun 2004 yang dibangun oleh BPPT khususnya BPDP (Balai Pengkajian Dinamika Pantai). *Prototype* OWC dibangun di pantai Parang Racung, Gunung Kidul. Selain OWC, teknologi lain yang lebih dulu adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandul (PLTGL-SB). Penelitian PLTGL-SB dimulai pada tahun 2002 oleh Zamrisyaf, seorang pegawai pusat penelitian dan pengembangan PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN).

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul milik Zamrisyaf tersusun atas ponton dan sistem bandul dengan ukuran ponton L: 6 m, B: 3 m, T_p : 1.5 s, dan D: 2 m dengan besar kemiringan sudut lambung ponton 45^0 . Terdapat dua jenis bandul berdasarkan posisinya, yaitu pendulum diletakkan secara vertikal dan horizontal. Uji perdana PLTGL-SB dilakukan pertama kali di Pantai Ulank Karang, Padang tahun 2002 dan mendapat hak paten tahun 2009 dengan bandul horizontal dan vertikal yang diletakkan di atas drum-drum.

Konsep PLTGL- SB terus disempurnakan melalui berbagai penelitian yang dilakukan setelahnya. Tahun 2012 penelitian PLTGL-SB dikembangkan dengan memvariasikan bentuk ponton segi delapan yang disusun menjadi sebuah segitiga (tripod) pada tinggi gelombang 0.5 m dan 1.5 m (Yasin Bestari, 2013). Penelitian ini dilakukan berbasis simulasi menggunakan software *Numeca* dengan tujuan mendapatkan olah gerak ponton yang optimal untuk PLTGL-SB. Tahun 2013 penelitian PLTGL-SB dikembangkan oleh Saadilah Akbar dengan memvariasikan kemiringan lambung ponton pada ketinggian gelombang laut, yaitu 1 m dan 1.5 m. Pada tahun 2014 penelitian dilakukan kembali dengan melakukan studi eksperimen pada bentuk ponton atau pelampung. Pelampung yang diteliti berbentuk oval, bola,

dan tabung. Gaya bangkitan terbesar diperoleh pada bentuk pelampung bola, karena pada penelitian ini pelampung bola memiliki luas penampang air yang lebih besar dibandingkan dengan bentuk lain. Karena dapat diketahui semakin panjang penampang yang terkena air maka akan memengaruhi daya yang diterima pelampung (Cahyadi, 2014).

Penelitian yang dikerjakan penulis, yaitu melakukan analisa PLTGL-SB dengan bentuk ponton terdiri dari 3 buah silinder, satu silinder besar dan dua buah silinder kecil (jukung) sebagai penyeimbang. Variasi yang dibuat pada penelitian ini adalah variasi panjang lengan jukung, tinggi jukung, dan tinggi sarat air. Selanjutnya akan dianalisa pengaruh variasi tersebut terhadap gerakan ponton dengan software Ansys Aqwa hingga ditemukan model ponton terbaik untuk PLTGL-SB. Setelah itu, dilakukan perumusan model matematik untuk mengetahui simpangan pendulum pada satu derajat kebebasan gerak ponton dan satu derajat kebebasan gerak pendulum. Validasi simulasi dilakukan menggunakan studi eksperimen.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas, permasalahan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bentuk ponton manakah yang terbaik untuk PLTGL-SB ?
2. Berapa simpangan yang dihasilkan pendulum akibat gaya eksitasi ponton ?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah di atas dapat diambil tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Mengetahui bentuk ponton terbaik untuk sistem PLTGL-SB
2. Mengetahui simpangan terbesar yang dihasilkan pendulum akibat gaya eksitasi ponton.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Dimensi *prototype* ponton yang disimulasikan adalah ponton berbentuk tiga buah silinder. Satu silinder besar ditengah dan dua buah silinder kecil (jukung) di kedua sisi silinder besar sebagai penyeimbang. *Prototype* ponton memiliki skala 1:10 dengan bentuk aslinya.
2. Analisa gerak ponton dengan Ansys Aqwa ditinjau pada tiga *degree of freedom* yaitu, *roll*, *heave*, dan *pitch*.
3. Ponton yang akan diteliti dalam keadaan tidak tertambat.
4. Simpangan ponton dan pendulum adalah simpangan yang kecil.
5. Analisa gerak pendulum dilakukan menggunakan model matematis satu gerakan ponton (*Roll*) dan mode gerakan pendulum
6. Gelombang yang digunakan adalah jenis gelombang regular.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah dapat mengetahui bentuk ponton model silinder yang terbaik untuk PLTGL-SB dan mengetahui simpangan pendulum terbesar akibat gerak ponton.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian tugas akhir ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi penelitian, dan sistematika laporan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori gelombang, teori gerak dinamik ponton, dan teori gerak pendulum.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah yang dilakukan dalam penelitian.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisa hasil simulasi respon ponton terhadap gelombang regular dengan software Ansys Aqwa dan analisa besar simpangan pendulum berdasarkan respon yang dihasilkan dari penurunan rumus model matematik

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil respon ponton dan pendulum dan saran penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

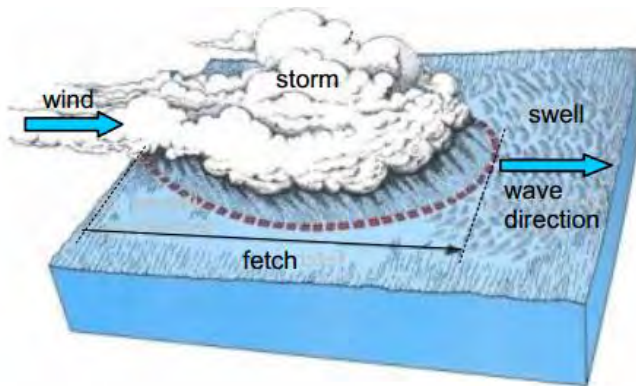
Daftar pustaka dari semua referensi yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini

LAMPIRAN

BAB II DASAR TEORI

2.1 Teori Dasar Gelombang Laut

Gelombang laut adalah pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk sinusoidal. Gelombang laut bisa dibangkitkan oleh angin, gaya tarik matahari, dan bulan, letusan gunung berapi, atau gempa di laut, kapal yang bergerak, dan sebagainya. Besarnya gelombang laut tergantung dari intensitas, jangka waktu, dan jarak angin berhembus (*fetch length*). Gelombang menyerap energi dari angin, dan sebaliknya mengeluarkan energi untuk penyebaran, kondisi keseimbangan ini disebut sebagai *fully developed seas*.



Gambar 2. 1 Formasi Gelombang Laut (Rodrigues, 2012)

Gelombang akan mereda sampai dengan beberapa hari terutama karena gaya gravitasi (*Gravity Wave*). Gelombang lancip dan kecil mereda karena mekanisme gelombang pecah disamping itu gelombang juga akan teredam oleh efek kekentalan. Gelombang yang mereda bergerak ke tempat yang sangat jauh sebagai gelombang panjang dan beraturan (*Swell*).

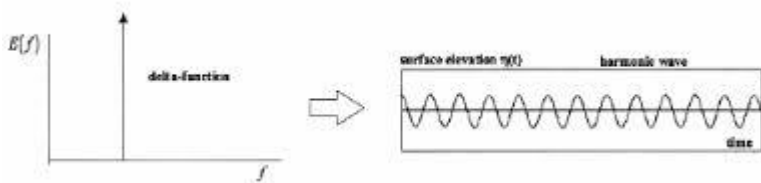
Terdapat beberapa teori gelombang dengan beberapa derajat kekompleksan dan ketelitian, untuk menggambarkan kondisi

gelombang di alam diantaranya adalah teori Airy, Stokes, Gerstner, Mich, Knoidal, dan Tunggal. Teori gelombang Airy merupakan teori gelombang amplitudo kecil sedangkan gelombang yang lain adalah gelombang terbatas (*finite amplitude waves*). Teori gelombang *Airy* disebut juga dengan teori gelombang linear.

2.2 Gelombang Reguler

Gelombang reguler merupakan gelombang dengan tinggi gelombang yang konstan, periode tunggal, sehingga gelombang ini juga mempunyai spectrum tunggal. (Fatnata, 2009). Teori gelombang reguler adalah pendekatan dari sebuah kenyataan dengan beberapa asumsi penyederhanaan dan idealisasi. Berikut ini adalah asumsi dasar teori gelombang:

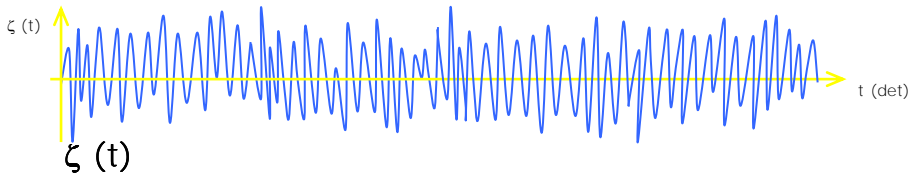
- Fluida dianggap homogen
- Tekanan permukaan diabaikan
- Pressure di permukaan bebas dianggap konstan dan uniform
- Fluida dianggap ideal (tidak bisa ditekan/ invicid dan incompressible)
- Gerakan partikel berdiri sendiri, tidak saling mengganggu dan bertubrukan selama bergerak
- Dasar laut dianggap datar, tetap impermeable. Sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol



Gambar 2. 2 Spektrum Tunggal Karakteristik Gelombang Reguler (Akhwady, 2010)

Sedangkan gelombang irregular merupakan gelombang superposisi dari beberapa gelombang reguler yang mempunyai frekuensi dan tinggi gelombang berbeda. Gelombang laut

mempunyai bentuk dan arah gerakan tak beraturan/acak (*random*) dan tidak pernah berulang urutan kejadiannya, sehingga teori gelombang reguler tidak dapat secara langsung (*deterministik*) menjelaskannya.



Gambar 2. 3 Gelombang Acak atau Irreguler (Akhwady, 2010)

Pada gelombang regular terdapat istilah *Response Amplitude Operator* (RAO) adalah respon struktur terhadap gelombang regular.

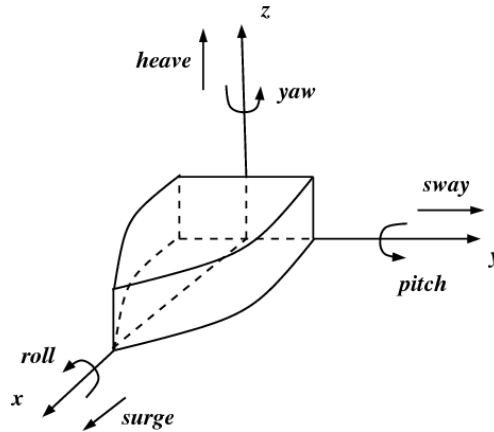
2.3 Teori Dasar Gerakan Bangunan Laut Akibat Beban Gelombang

Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai 6 mode gerakan bebas (SDOF- six degree of freedom) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional. Berikut ini adalah keenam mode gerakan tersebut :

1. Mode Gerakan Translasional
 - Surge, gerakan transversal arah sumbu x
 - Sway, gerakan transversal arah sumbu y
 - Heave, gerakan transversal arah sumbu z
2. Mode Gerakan Rotasional
 - Roll, gerakan rotasional arah sumbu x
 - Pitch, gerakan rotasional arah sumbu y
 - Yaw, gerakan rotasional arah sumbu z

Definisi gerakan bangunan laut dalam enam derajat kebebasan dengan memakai konversi subu tangan kanan, tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y, dan z adalah masing-masing *surge*, *sway*, dan *heave* sedangkan untuk gerakan rotasi

terhadap ketiga subu adalah *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Dengan demikian domain gerakan yang mempengaruhi kapal dan ponton adalah gerakan rotasi dan translasi.



Gambar 2. 4 *Six Degree of Freedom (SDOF) Gerakan Kapal*
(Djatkiko, 2012)

2.4 RAO (Response Amplitude Operator)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang disebabkan akibat gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus sebagai berikut

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots(2.1)$$

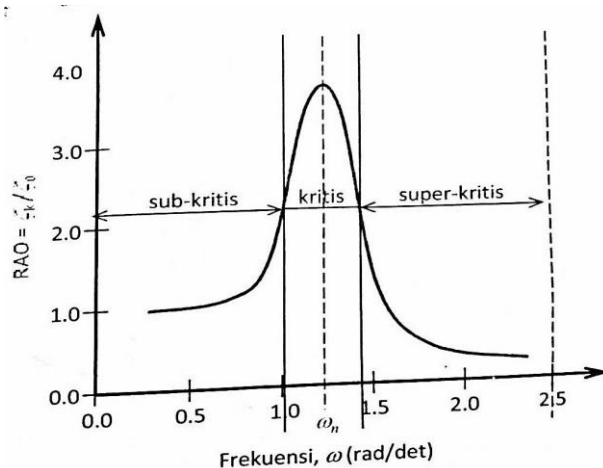
Dimana :

$X_p(\omega)$ = amplitudo struktur

$\eta(\omega)$ = amplitudo gelombang

Kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian :

- a. Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub- kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang, sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *conturing*.



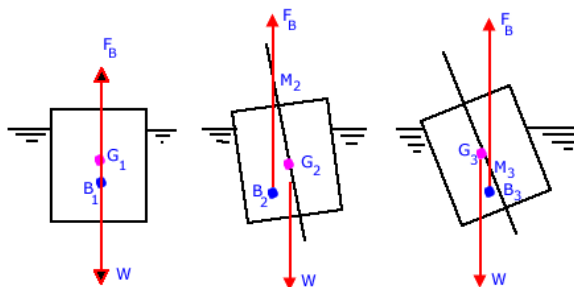
Gambar 2. 5 Bentuk Umum Grafik Respon Gerakan Bangunan Apung (Djatkiko, 2012)

- b. Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respon gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang.

- c. Ketiga adalah gerakan super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang- gelombang (dengan periode pendek). Pada daerah ini respon gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak diatas air yang relatif datar. Oleh karena itu kondisi ini dapat diistilahkan sebagai *platforming*.

2.5 Teori Stabilitas

Sebuah benda yang berada pada posisi keseimbangan digeser ke suatu posisi baru, lalu mampu kembali ke posisi awal, benda tersebut disebut berada dalam keseimbangan stabil (*stable equilibrium*) dan kondisi tersebut disebut stabilitas positif terhadap acuan keseimbangan posisi awalnya. Apabila saat benda tersebut digerakkan dari posisi kesetimbanganya ke posisi baru dan kemudian tetap pada posisi baru tersebut, benda tersebut disebut dalam keseimbangan netral (*neutral equilibrium*), tetapi apabila suatu benda setelah digerakkan ke suatu posisi baru, benda tersebut terus bergerak semakin menjauhi posisi awalnya, maka keseimbangan benda tersebut dikatakan keseimbangan labil (*unstable equilibrium*) dan kondisi ini dikategorikan sebagai stabilitas negatif terhadap acuan posisi awalnya.

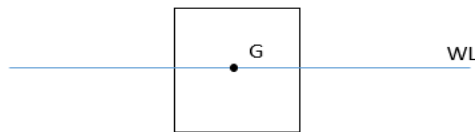


Gambar 2. 6 Tiga Kondisi Kestabilan (Barras, 2006)

Pada struktur terapung akan terdapat dua buah gaya vertikal yang bekerja, yakni gaya apung (*buoyancy*) yang mengarah ke atas dan berat struktur itu sendiri yang mengarah kebawah.

- Titik Berat (*Center of Gravity, G*)

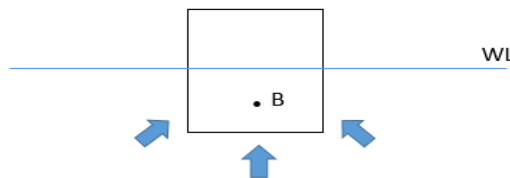
Titik berat (G) ialah titik tangkap dari semua gaya- gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada benda kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diketahui bahwa letak titik G tergantung daripada pembagian berat di benda. Jadi, selama tidak ada berat yang digeser, ditambah, atau dikurangi titik G tidak akan berubah walaupun benda oleng atau *trim*. Berat pendulum pada penelitian ini sangat kecil, jadi dianggap tidak mempengaruhi titik gerak ponton.



Gambar 2. 7 Contoh Titik Berat Sebuah Benda Terapung
(Barras, 2006)

- Titik Apung (*Center of Buoyancy, B*)

Titik apung (center of buoyancy) dikenal dengan titik B dari sebuah benda, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan keatas dari bagian benda yang terbenam dalam air.

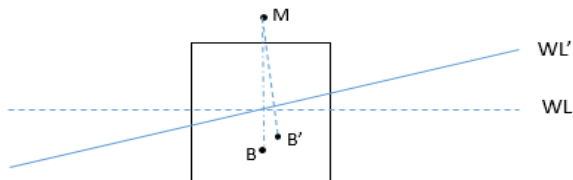


Gambar 2. 8 Letak Titik Berat di Air (Barras, 2006)

Titik tangkap B bukanlah suatu titik yang tetap, akan tetapi akan berpindah- pindah oleh adanya perubahan sarat dari benda. Dalam stabilitas benda, titik B inilah yang menyebabkan benda mampu untuk tegak kembali setelah mengalami senget. Letak titik B tergantung dari besarnya senget benda (bila senget berubah maka letak titik B akan berubah atau berpindah).

- Titik Metasentris (M)

Titik metasentris atau lebih dikenal dengan titik M dari sebuah benda, merupakan sebuah titik semu dari batas dimana titik G tidak boleh melewati di atasnya agar benda tetap mempunyai stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya berubah- ubah, jadi titik metasentris dapat berubah letaknya tergantung besarnya sudut senget. Apabila benda senget pada sudut kecil maka titik apung B bergerak di sepanjang busur di mana titik M merupakan titik pusatnya di bidang tengah benda (*center of line*) dan pada sudut senget yang kecil ini perpindahan letak titik M masih sangat kecil, sehingga masih dapat dikatakan tetap. Jika garis kerja gaya apung pada keadaan tegak dan garis kerja gaya apung dalam keadaan miring dilanjutkan, keduanya akan berpotongan di suatu titik. Titik potong ini kita beri nama **M**, singkatan dari *metasenter*. (Mutedjo, 1999)



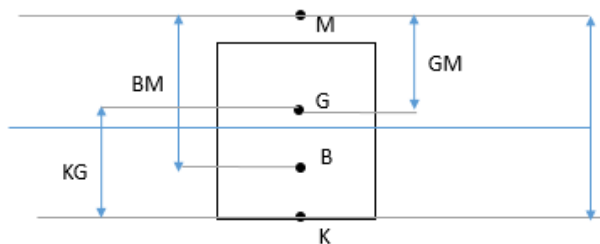
Gambar 2. 9 Letak Titik *Metacenter* (Barras, 2006)

2.6 Parameter dalam Stabilitas

Ada beberapa parameter stabilitas yang sering digunakan dalam stabilitas, hal ini lah yang nantinya akan dipergunakan

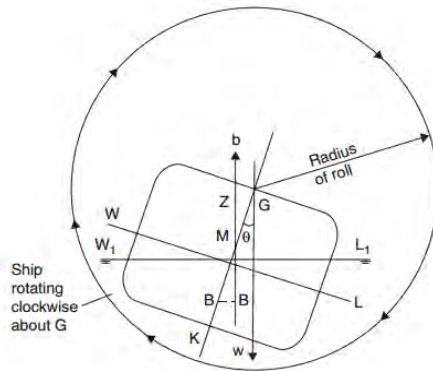
untuk merancang stabilitas pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandul, seperti pada gambar berikut:

- \overline{KG} - Adalah tinggi titik dari keel ke *center of gravity*
 Nilai \overline{KB} yang dihitung dari titik keel ke titik *center of gravity* didapat dari perhitungan massa benda dikali dengan titik koordinat suatu benda dibagi dengan massa total benda.



Gambar 2. 10 Parameter yang di gunakan dalam Perhitungan Stabilitas (Barras, 2006)

- \overline{BM} - *Radius Metacentric*
 BM dinamakan jaari- jari metasentris atau metasentris radius karena bila kapal mengoleng dengan sudut- sudut yang kecil, maka lintasan pergerakan titik B merupakan sebagian busur lingkaran dimana M merupakan titik pusatnya dan \overline{BM} sebagai jari- jarinya. Titik M masih bisa dianggap tetap karena sudut olengnya kecil.
- \overline{KB} – Tinggi titik apung dari keel
 Letak titik B diatas keel bukanlah suatu titik yang tetap, akan tetapi berpindah pindah oleh adanya perubahan sarat atau senget kapal. Menurut Rubianto (1996), nilai \overline{KB} dapat dicari:
 Untuk kapal tipe plat bottom, $\overline{KB} = 0.50d$
 Untuk kapal tipe V bottom, $\overline{KB} = 0.67d$
 Untuk kapal tipe U bottom, $\overline{KB} = 0.53d$
 Dimana d adalah draft kapal

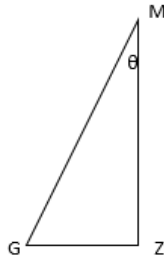


Gambar 2. 11 Metasenter dan Jari- jari metasenter (Barras, 2006)

2.7 Segitiga Stabilitas

Bila suatu kapal senget maka titik apung akan bergerak sedangkan titik berat (gravitasi) tidak berubah. Gaya apung dan gravitasi saling berlawanan arah dan sama besar, tetapi jika kapal senget akan membentuk dua gaya yang paralel dengan arah yang berlawanan, mengakibatkan terjadinya rotasi. Rotasi ini mengakibatkan kapal kembali ke posisi semula karena gaya apung dan gaya gravitasi sama besar dan berlawanan arah maka akan saling menghilangkan. Hal ini dikatakan sebagai pasangan (*coupled*) karena dua gaya yang bekerja menghasilkan rotasi. Rotasi inilah yang menyebabkan terjadinya keseimbangan kapal.

Jarak antara gaya apung dan gravitasi disebut sebagai lengan penegak. Pada gambar diatas lengan penegak merupakan garis yang ditarik dari titik gravitasi ke vektor gaya apung kapal, untuk kemiringan yang kecil nilai penegak (GZ) dapat diperoleh secara trigonometri. Stabilitas awal dengan sudut yang kecil maka titik metasenter tidak akan berubah, dan fungsi sinus hampir linier (garis lurus). Oleh karena itu lengan penegak kapal $< \frac{GZ}{GM}$ proporsional terhadap ukuran dan tinggi metasenter, GM , sehingga GM adalah ukuran awal stabilitas kapal.



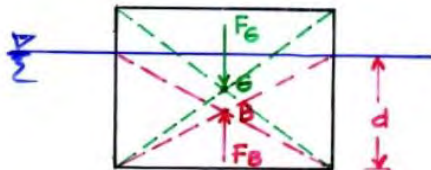
Gambar 2. 12 Titik Stabilitas Kapal (Barras, 2006)

2.8 Kestimbangan

Benda terendam didalam zat cair diam, gaya- gaya yang bekerja adalah tekanan hidrostatis pada seluruh permukaan benda dan berat benda. Pada benda terendam dalam zat cair diam terdapat

- Komponen Gaya Horizontal : sama dan berlawanan arah sehingga saling meniadakan dan benda tidak bergerak
- Komponen Gaya Vertikal : akibat tekanan tiap satuan luas bertambah dengan kedalaman, sehingga komponen gaya keatas (F_u) lebih besar dari komponen gaya ke bawah (F_d) atau resultannya adalah gaya keatas yang bekerja pada benda.

Perbedaan antara gaya tekanan ke atas dan ke bawah pada benda disebut gaya apung (F_b). Gaya apung ini dapat dijelaskan dengan hukum Archimedes: “ Benda yang terapung/ terendam dalam zat cair akan mengalami gaya apung yang besarnya sama dengan berat zat cair yang dipindahkan benda tersebut”.



Gambar 2. 13 Tiga Kondisi Kestimbangan (Barras, 2006)

- F_G : Gaya Berat
 d : Sarat/ draft
 B : Titik apung (titik dimana gaya apung bekerja, atau titik berat air dari volume zat cair yang dipindahkan)
 F_B : Gaya Apung
 G : Titik Berat

Terdapat tiga kemungkinan yang akan terjadi jika benda diletakkan di dalam zat cair

- $FB > FG$; benda akan naik keatas permukaan zat cair hingga nilai berat benda yang bekerja pada titik berat G = berat zat cair yang dipindahkan dan benda akan terapung.
- $FB < FG$; benda akan tenggelam
- $FB = FG$: benda melayang

2.9 Konsep Getaran

Getaran adalah gerakan bolak- balik dalam suatu interval waktu tertentu. Getaran berhubungan dengan gerak osilasi benda dan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut. Semua benda yang mempunyai massa dan elastisitas mampu bergetar. Jadi kebanyakan mesin dan struktur rekayasa (engineering) mengalami getaran sampai derajat tertentu dan rancangannya biasanya memerlukan pertimbangan sifat osilasinya. Secara umum, ada dua jenis getaran, bebas dan paksa.

a. Geratan Bebas

Getaran bebas adalah gerakan periodic yang diamati sebagai sitem yang berpindah dari kedudukan kesetimbangan statis. Gaya yang bekerja adalah gaya pegas, gaya gesekan, dan berat massa. Akibat adanya gesekan, getaran hilang sesuai dengan waktu. Getaran ini disebut gearan bebas (*free vibration*). (Seto, 1964)

b. Getaran Paksa

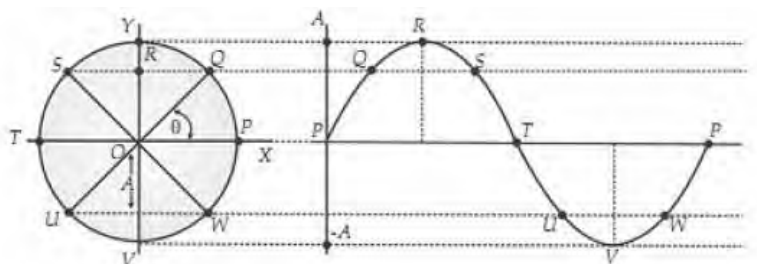
Bila gaya luar bekerja pada sistem selama gerakan getarannya, diterminologikan sebagai getaran paksa (*forced vibration*). Pada getaran paksa, sistem cenderung bergetar pada frekuensi sendiri disamping mengikuti frekuensi gaya eksitasi. Dengan adanya gesekan, bagian gerakan yang ditahan oleh gaya

eksitasi sinusoidal secara perlahan hilang. Dengan demikian sistem akan bergetar pada frekuensi gaya eksitasi dengan mengabaikan kondisi awal atau frekuensi pribadi sistem. Bagian getaran yang berlanjut terus disebut getaran keadaan steady (tunak) atau respon (response) sistem. Respon keadaan sistem selalu dibutuhkan dalam analisa getaran karena efek sinambungannya. (Seto, 1964)

Getaran bebas terjadi bila gerakan dipertahankan oleh gaya gravitasi atau gaya pemulih elastis, seperti misalnya gerakan mengayun sebuah bandul atau getaran barang elastis. Atau dengan kata lain sistem berosilasi karena bekerjanya gaya-gaya yang ada di dalam sistem itu sendiri (*inherent*) dan jika tidak ada gaya luar yang bekerja. Getaran paksa disebabkan gaya periodik eksternal atau gaya intermitten yang diberikan pada sistem. Dengan kata lain, sistem berosilasi karena rangsangan gaya luar dan dipaksa untuk bergetar pada frekuensi rangsangan. Jika frekuensi rangsangan sama dengan salah satu frekuensi natural sistem, maka akan didapat keadaan resonansi, dan osilasi besar yang berbahaya mungkin terjadi.

2.10 Gerak Harmonik Sederhana

Sebuah pendulum sederhana dapat dideskripsikan sebagai sebuah massa yang digantungkan pada tali yang massanya dapat diabaikan sehingga dapat bergerak bolak-balik. Pendulum sederhana dapat didekati sebagai sebuah besi kecil berbentuk silinder dengan jari-jari yang kecil dan massa yang besar jika dibandingkan dengan panjang dan massa dari tali yang digunakan untuk menggantung besi silinder tersebut.



Gambar 2. 14 Ilustrasi Gerak Harmonik Sederhana (Parks, 2000)

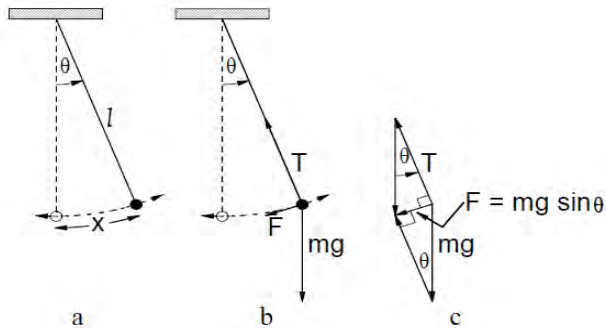
Gerak harmonik sederhana adalah gerak bolak-balik benda melalui suatu titik kesetimbangan tertentu dengan banyaknya getaran benda dalam setiap sekon selalu konstan. Gerak harmonik dapat dinyatakan dengan grafik posisi partikel sebagai fungsi waktu berupa sinus atau kosinus seperti halnya pada gambar 2.13 Contoh gerak harmonik antara lain adalah gerakan sebuah bandul yang tergantung pada suatu tali yang massanya dapat diabaikan seperti halnya penjelasan di atas.

Ketika pendulum dipindahkan dari titik equilibriumnya, akan ada gaya pemulih yang membuat pendulum kembali ke titik kesetimbangannya. Gaya pemulih pada pendulum ini besarnya merupakan resultan dari berat pendulum dengan tegangan dari tali. Jika massa dari pendulum adalah m dan tergantung pada tali sepanjang l dan berpindah dengan sudut θ dan jarak x dari titik kesetimbangan (gambar 2.14), maka gaya gravitasi akan bernilai sebagaimana persamaan 2.2

$$F = mg \sin \theta \dots\dots\dots (2.2)$$

Jika sudut θ bernilai kecil, maka $\sin \theta$ akan sama dengan θ , dan apabila kita substitusikan x/l untuk θ , maka akan didapatkan persamaan 2.3 di bawah ini.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \dots\dots\dots (2.3)$$



Gambar 2. 15 Gaya yang Bekerja pada Pendulum (Parks, 2000)

Selain itu, parameter yang penting pada gerak harmonik sederhana adalah simpangannya. Simpangan getaran harmonik sederhana dapat dianggap sebagai proyeksi partikel yang bergerak melingkar beraturan pada diameter lingkaran sebagaimana pada gambar 2.14 yang melukiskan sebuah partikel yang bergerak melingkar beraturan dengan kecepatan sudut ω dan jari-jari A . Anggap mula-mula partikel berada di titik P. Pada saat $t = 0$, partikel berada di titik P, setelah t sekon berada di Q. Besarnya sudut yang ditempuh adalah sebagaimana persamaan....

$$\theta = \omega t = \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots(2.5)$$

Simpangan gerak harmonik sederhana merupakan proyeksi titik Q pada salah satu sumbu utamanya (sumbu Y). Jika A adalah amplitudo simpangan (m), T adalah periode (s), ω adalah kecepatan sudut (rad/s), t adalah waktu (s), dan simpangan itu dinyatakan dengan sumbu Y, maka:

$$Y = A \sin \theta = A \sin \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$Y = A \sin \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots(2.7)$$

Besar sudut (θ) dalam fungsi sinus disebut sudut fase. Jika partikel mula-mula berada pada posisi sudut θ_0 , maka persamaanya dapat dituliskan sebagaimana persamaan.....

$$Y = A \sin \theta \dots\dots\dots (2.8)$$

$$Y = A \sin(\omega t + \theta_0) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \theta_0\right) \dots\dots\dots (2.10)$$

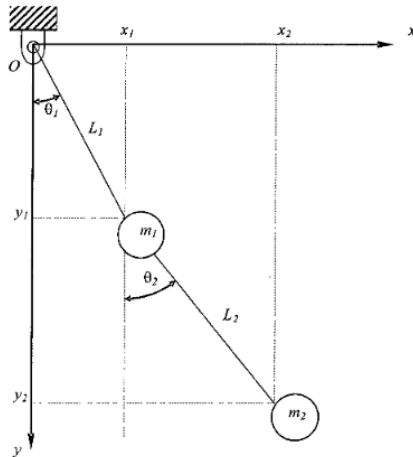
Maka sudut fase getaran harmoniknya adalah sebagaimana persamaan di bawah ini.

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} + \theta_0 \dots\dots\dots (2.11)$$

2.11 Koordinat Umum dan Persamaan Lagrange

Persamaan Lagrange memberikan cara yang sistematis untuk memformulasikan persamaan gerak dari sistem mekanik atau sistem struktural yang fleksibel dengan derajat kebebasan yang banyak. Dengan menggunakan persamaan Lagrange (persamaan 2.12), solusi dari suatu persamaan diferensial getaran dengan derajat kebebasan yang banyak dapat lebih mudah untuk didapatkan dibandingkan ketika menggunakan metode Newton. Dengan menggunakan persamaan Lagrange, maka pendekatan skalar diperoleh dengan adanya nilai skalar dari energi kinetik dan energi potensial untuk masing-masing koordinat umum. Misalnya saja kita tinjau sistem dengan pendulum bertingkat sebagaimana gambar 2.16.

Koordinat umum dari sistem di atas yaitu θ_1 dan θ_2 . Setelah didapatkan energi kinetik dan energi potensial dari masing-masing koordinat umum, maka solusi dari persamaan diferensial getaran dengan pendulum bertingkat dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan Lagrange.



Gambar 2. 16 Sistem dengan Pendulum Bertingkat (Parks, 2000)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial U}{\partial q} + \frac{\partial DE}{\partial \dot{q}} = Q_r \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

T = Energi kinetik sistem

U = Energi potensial sistem

DE = Energi redaman sistem

Q_r = Gaya Luar

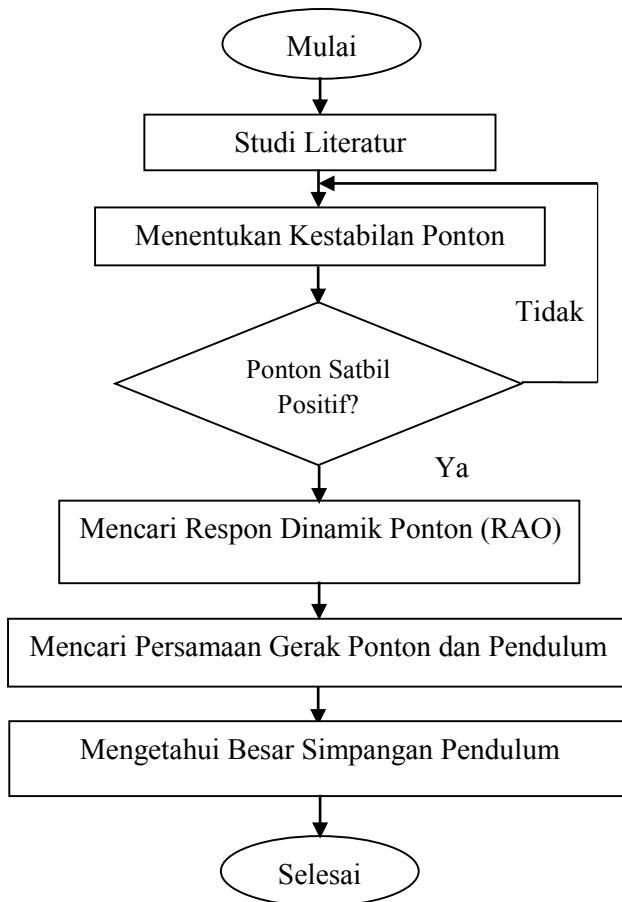
q = Koordinat Umum

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum, tahapan penelitian yang dilakukan penulis dapat digambarkan pada diagram alir seperti gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian

Proses penelitian tugas akhir ini diawali dengan studi literatur mengenai penelitian Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul (PLTGL-SB) yang sudah ada sebelumnya. Penulis juga membuat ringkasan dari jurnal mengenai PLTGL-SB. Hal-hal dasar yang penulis pelajari pada tahapan studi literatur adalah ilmu mengenai gelombang laut, olah gerak bangunan laut, respon bangunan laut terhadap gaya eksitasi gelombang. Setelah itu, penulis menentukan kestabilan ponton. Penentuan kestabilan ditentukan oleh tiga buah titik yaitu, *Centre of Gravity* (COG), *Centre of Buoyancy* (COB), dan titik metasenter. Ponton yang sudah dapat dikatakan stabil positif jika posisi titik metasenter diatas titik COG dan COB. Stabil positif artinya ponton akan kembali keposisi awal jika ponton terkena gaya eksitasi dari gelombang laut. Setelah itu Penulis juga mempelajari teori CFD untuk bangunan laut yang terapung. Setelah itu, penulis mengambil data kedalaman *towing tank* tempat uji alat, periode gelombang, dan amplitudo gelombang melalui rangkaian eksperimen. Setelah melakukan pengambilan data, penulis melakukan analisa respon ponton terhadap gaya eksitasi gelombang untuk mencapai tujuan pertama dari tugas akhir ini, yaitu mengetahui bentuk ponton terbaik untuk PLTGL-SB dengan berbagai variasi yang dilakukan. Respon gerak ponton didapatkan dengan menyimulasikan ponton menggunakan Ansys *Hydrodynamic Diffraction* atau Ansys Aqwa. Hasil simulasi pada *hydrodynamic diffraction* tersebut akan diketahui nilai *response amplitude operator* (RAO) atau respon ponton akibat gelombang laut yang datang. Hasil simulasi berupa analisa RAO ponton dilakukan sebanyak 16 variasi. Variabel yang divariasikan diantaranya adalah ketinggian sarat air. Sarat air yang berbeda akan mempengaruhi besarnya gerakan kapal (bangunan laut) yang terapung (Mulyawan, 2010). Perbedaan tinggi sarat air akan memengaruhi pada besar nilai titik COB dan titik Metasenter. Variasi jukung dilakukan karena panjang jukung akan memengaruhi kestabilan kapal (Barras, 2006).

Jumlah variasi ditampilkan pada tabel 3.1. Variasi yang digunakan untuk menganalisa yaitu variasi ponton ke-1, 2, 9, 11,

dan 15. Sedangkan variasi massa pendulum dan tinggi lengan pendulum akan memengaruhi COG ponton.

Tujuan kedua pada penelitian ini, yaitu mengetahui besar simpangan pendulum, dicapai dengan melakukan model matematik sampai mendapatkan persamaan gerak dan respon pendulum. Pemodelan matematik dilakukan pada satu derajat bebas ponton (*roll*) dan satu derajat bebas pendulum. Tabel 3.2 adalah detail variasi pendulum. Variasi pendulum massa dan lengan pendulum dilakukan untuk mengetahui simpangan yang akan dihasilkan pendulum dan dicari simpangan terbesar untuk dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Variasi yang digunakan untuk menganalisa data adalah variasi ke 5, 6, 9, 10, 21 dan 23.

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian Ponton

Variasi	Sarat	Tinggi Jukung (cm)	Panjang Jukung (cm)	Lengan Pendulum (cm)	Massa Pendulum (gr)
1	1/2 D	4	49.5	16.5	40.6
2	1/2 D	4	49.5	16.5	19.9
3	1/2 D	4	49.5	10.67	40.6
4	1/2 D	4	49.5	10.67	19.9
5	1/2 D	4	41.5	16.5	40.6
6	1/2 D	4	41.5	16.5	19.9
7	1/2 D	4	41.5	10.67	40.6
8	1/2 D	4	41.5	10.67	19.9
9	2/3 D	1.5	49.5	16.5	40.6
10	2/3 D	1.5	49.5	16.5	19.9
11	2/3 D	1.5	49.5	10.67	40.6
12	2/3 D	1.5	49.5	10.67	19.9
13	2/3 D	1.5	41.5	16.5	40.6
14	2/3 D	1.5	41.5	16.5	19.9
15	2/3 D	1.5	41.5	10.67	40.6
16	2/3 D	1.5	41.5	10.67	19.9

Tabel 3. 2 Variasi Penelitian Pendulum

variasi	Sarat	Periode Gelombang (s)	Massa (gr)	Tinggi Lengan (cm)
1	1/2 D	0.4	40.6	16.5
2	1/2 D	0.4	40.6	10.67
3	1/2 D	0.4	19.9	16.5
4	1/2 D	0.4	19.9	10.67
5	1/2 D	0.6	40.6	16.5
6	1/2 D	0.6	40.6	10.67
7	1/2 D	0.6	19.9	16.5
8	1/2 D	0.6	19.9	10.67
9	1/2 D	0.8	40.6	16.5
10	1/2 D	0.8	40.6	10.67
11	1/2 D	0.8	19.9	16.5
12	1/2 D	0.8	19.9	10.67
13	2/3 D	0.4	40.6	16.5
14	2/3 D	0.4	40.6	10.67
15	2/3 D	0.4	19.9	16.5
16	2/3 D	0.4	19.9	10.67
17	2/3 D	0.6	40.6	16.5
18	2/3 D	0.6	40.6	10.67
19	2/3 D	0.6	19.9	16.5
20	2/3 D	0.6	19.9	10.67
21	2/3 D	0.8	40.6	16.5
22	2/3 D	0.8	40.6	10.67
23	2/3 D	0.8	19.9	16.5
24	2/3 D	0.8	19.9	10.67

3.2 Desain PLTGL

Desain PLTGL yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari ponton dengan tiga buah silinder. Satu silinder besar dan dua buah silinder kecil (jukung) yang terletak dibagian kanan dan kiri sebagai penyeimbang. Bentuk pendulum yang diteliti adalah pendulum vertikal. Ponton dengan bentuk seperti itulah yang dijadikan objek simulasi CFD dan diamati respon gerak akibat gaya eksitasi dari gelombang yang datang. Berikut ini adalah

ukuran rinci ponton dan pendulum yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 3. 3 Geometri PLTGL-SB

Geometri PLTGL	
Diameter Silinder Besar (D)	16.5 cm
Tebal Silinder Besar	0.7 cm
Diameter Silinder Kecil (Jukung)	4 cm
Tebal Silinder Kecil	0.2 cm
Panjang Silinder Besar	32 cm
Panjang Silinder Kecil	32 cm
Massa Jenis Silinder	1.39 gr/cm ³
Sarat Air	1/2 D dan 2/3 D
Tinggi Jukung	1.5 cm dan 4 cm
Panjang Plat	32 cm
Lebar Plat	17 cm
Massa Jenis Plat	1.2 gr/cm ³
Tinggi tiang Pendulum	2.75 cm (dari plat)
Tiang Lengan Pendulum	23 cm
Massa Pendulum	40.6 gr dan 19.9 gr

Tahap selanjutnya yaitu menghitung kestabilan ponton, dengan menentukan titik *center of gravity*, *center of buoyancy*, dan titik *metacentre*. Titik metacentrum dicari dengan menggunakan rumus sebagai berikut

$$M = \frac{I_o}{V} - A_o B_o \dots\dots\dots (3.1)$$

Dengan mencari titik *metacenter*, kita dapat melihat apakah ponton stabil atau tidak. Berdasarkan nilai metasentrum maka dapat ditentukan bahwa, jika M diatas titik berat maka benda dikatakan stabil, M = titik berat maka ponton dikatakan dalam stabilitas netral, dan jika M dibawah titik berat maka dikatakan labil. Sedangkan titik *buoyancy* dicari dengan menggunakan software Maxsurf. COB diibaratkan sebagai COG dari bagian benda yang

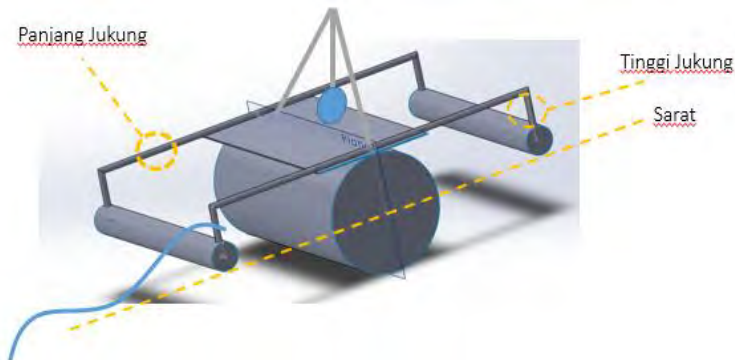
terendam, maka cara mencarinya akan sama dengan COG dengan catatan hanya bagian ponton yang terendam saja yang dijadikan sebagai tinjauan. Titik COG (*Center of Gravity*) dicari dengan menggunakan persamaan (3.2).

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \dots(3.2)$$

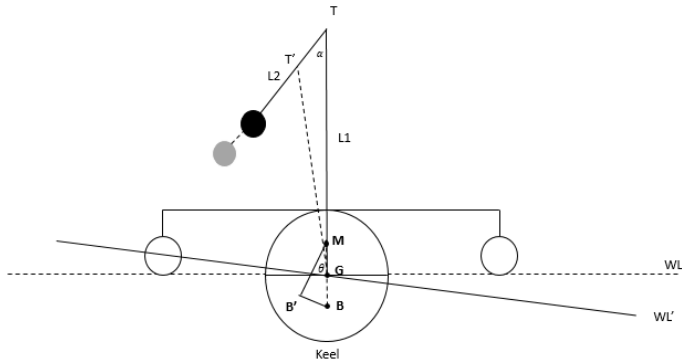
Hasil perhitungan ketiga titik tersebut pada ponton 1/2 D dan 2/3 D adalah sebagai berikut :

Tabel 3. 4 Perhitungan Ponton

Posisi dari Keel	Sarat 1/2 D	Sarat 2/3 D
Sarat	8.25 cm	11 cm
COB	4.752 cm	6.345 cm
Metacenter	12.17 cm	11.78 cm
Volume Tercelup	0.00342 m ³	0.00485 m ³
Massa Tercelup	3.42 kg	4.85 kg



Gambar 3.2 Gambar PLTGL-SB 3D



Gambar 3. 3 Gambar PLTGL-SB Tampak Depan

3.3 Simulasi CFD Ponton

3.3.1 Geometri Ponton

Silinder besar dan dua buah jukung dibuat satu kesatuan di *workbench*. Geometri ponton yang dibuat terdiri dari beberapa model berdasarkan variasi yang akan dilakukan. Geometri ponton yang dibuat terdiri dari 4 model. Geometri ponton dibuat dengan sarat $\frac{1}{2}$ D dengan panjang jukung 49.5 cm dan 41.5 cm. Lalu dibuat juga geometri ponton dengan sarat $\frac{2}{3}$ D dengan panjang jukung 49.5 cm dan 41.5 cm. Gambar 3.3 adalah contoh gambar geometri ponton di *workbench*.

3.3.2 Model Ponton

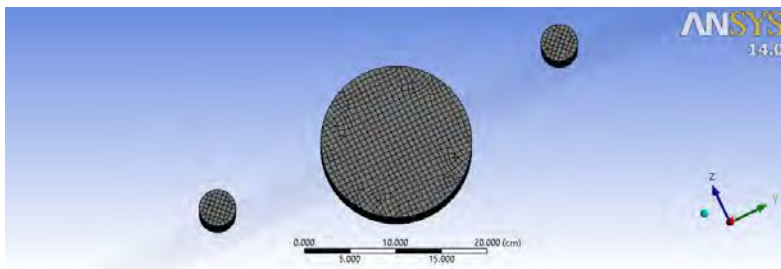
Setelah melalui tahap pembuatan geometri ponton tahap selanjutnya adalah memodelkan ponton. Tahap pemodelan ponton hal yang harus diinputkan, diantaranya :

- Kedalaman perairan, pada bagian geometri
- Massa jenis fluida (air), pada bagian geometri
- Water size pada sumbu x dan y, pada bagian geometri
- Titik COG (*Center of Gravity*), pada bagian *point mass*
- Jari-jari girasi, pada bagian *point mass*.

Kedalaman perairan yang diinputkan sesuai dengan kedalaman tangki tempat eksperimen alat dilakukan, yaitu sedalam 2 meter. *Water size* pada sumbu x yaitu 50 m dan sumbu y sebesar 3 m, sesuai dengan tangki tempat eksperimen dilakukan. Penentuan titik COG dan jari- jari girasi dilakukan dengan perhitungan manual menggunakan ms excel untuk masing-masing variasi ponton.

3.3.3 Meshing

Meshing merupakan proses pemecahan bagian domain menjadi kecil- kecil atau menjadi element. *Meshing* pada ansys *Hydrodynamic Diffraction* dapat secara otomatis ter-generate dengan meng-inputkan *defeaturing tolerance* dan *maximum element size*. Pada bagian *Generated Mesh information* maka akan ditampilkan jumlah *node* dan *element* hasil *meshing*. Jumlah maksimal element pada Ansys *Hidrodynamic Diffraction* adalah sebanyak 18.000 element dan 12.000 bagaian elemen yang terdifraksi. Number of nodes dan number of element adalah jumlah node dan element yang hasil *meshing*. *Number of node (diffracting body)* dan *number of element (diffracting body)* adalah jumlah node dan elemen pada ponton yang tercelup air.



Gambar 3. 4 Hasil Meshing Ponton

Tabel 3. 5 *Detail of Mesh*

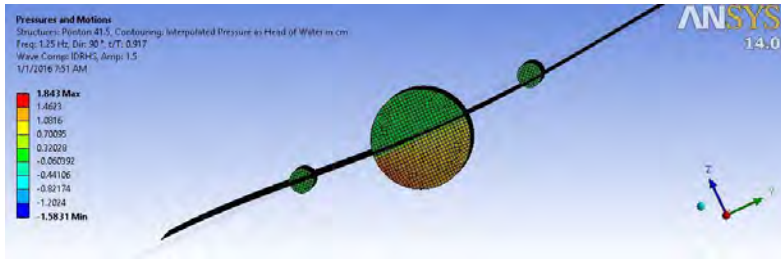
<i>Detail of Mesh</i>	
<i>Max Element Size</i>	1 cm
<i>Defeaturing Tolerance</i>	0.5 cm
<i>Number of Nodes</i>	8910
<i>Number of Elements</i>	8952
<i>Number of Nodes (Diffracting Bodies)</i>	3127

3.3.4 Pre-Processing

Setelah melakukan *meshing* tahap selanjutnya adalah tahap *setup*. Pada tahap ini diinputkan arah datang gelombang. Arah datang gelombang disesuaikan dengan eksperimen, yaitu arah 90^0 atau arah datang gelombang dari badan ponton. Setelah meng-inputkan *wave direction* tahap selanjutnya yaitu meng-inputkan rentang frekuensi gelombang. Kondisi default wave frequency dapat didefinisikan secara range maupun secara single. Pada tahap ini frekuensi gelombang diinputkan secara manual dalam suatu range. Range frekuensi yang digunakan terletak diantara 1 Hz hingga 5 Hz.

3.3.5 Post Processing

Tahap akhir simulasi pada *hydrodynamic diffraction* adalah *solution* atau hasil. Pada bagian ini penulis dapat menentukan hasil apa yang ingin dimunculkan. Karena tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui respon ponton akibat gelombang laut maka grafik RAO (*Response Amplitude Operator*) ditampilkan. Penelitian ini hanya akan menganalisa hasil grafik RAO yang terdapat pada bagian *solution*.



Gambar 3. 5 Hasil Simulasi dengan Gelombang Datang

3.4 Pemodelan Matematis Gerak Ponton dan Pendulum

Pemodelan matematis gerak ponton dan pendulum didapatkan dari perhitungan besar panjang titik B (*Buoyancy*), Metacenter (M), dan titik G (*Gravity*). Jarak ketiga titik ini dihitung dari titik *keel* ponton. Persamaan gerak didapat dengan mensimultankan gerak *one degree of freedom* ponton (*roll*) dan *one degree of freedom* pendulum dengan hukum Lagrange. Pada sarat $\frac{1}{2}$ diameter silinder besar, diketahui nilai sebagai berikut:

B (<i>Center of Buoyancy</i>)	: 4.752 m dari keel
M (<i>Metacenter</i>)	: 12.17 cm dari keel
G (<i>Center of Gravity</i>)	: 8.25 cm dari keel
\overline{GT} (Panjang dari titik G ke Tiang Bandul)	: 42.05 cm

Pada sarat $\frac{2}{3}$ diameter silinder besar, diketahui nilai sebagai berikut :

B (<i>Center of Buoyancy</i>)	: 6.345 m dari keel
M (<i>Metacenter</i>)	: 11.78 cm dari keel
G (<i>Center of Gravity</i>)	: 11 cm dari keel
\overline{GT} (Panjang dari titik G ke Tiang Bandul)	: 31.05 cm

Sebagaimana telah disebutkan pada bab 2 metode pencarian persamaan gerak menggunakan metode lagrange, yaitu meninjau dari sisi energi kinetik dan energi potensial sistem maka persamaan gerak sistem didapat dari penurunan sebagai berikut.

kinetik pendulum, EP1 adalah energi potensial ponton dan EP2 adalah energi potensial pendulum.

$$EK_1 = \frac{1}{2}m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2) \dots\dots\dots (3.10)$$

$$EK_2 = \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{z}_2^2) \dots\dots\dots (3.11)$$

$$EP_1 = m_1gy_1 \dots\dots\dots (3.12)$$

$$EP_2 = m_2gy_1 \dots\dots\dots (3.13)$$

Maka besar EK dan EP menjadi

$$EK_1 = \frac{1}{2}m_1(\overline{BM}^2)\dot{\theta}^2 \dots\dots\dots (3.14)$$

$$EK_2 = \frac{1}{2}m_2(\overline{GT}^2\dot{\theta}^2 + L_2^2\dot{\alpha}^2 - 2\overline{GT}L_2\dot{\theta}\dot{\alpha}) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$EP_1 = m_1g\overline{BM}\sin\theta\sin\theta \dots\dots\dots (3.16)$$

$$EP_2 = m_2g(-\overline{GT}\overline{BM}\sin\theta\sin\theta + L_2(1 - \cos\alpha)) \dots\dots\dots (3.17)$$

Persamaan Lagrange dicari dengan rumus sebagai berikut

Langrange untuk θ adalah

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial EK}{\partial \dot{\theta}}\right) + \frac{\delta EP}{\delta \theta} - \frac{\delta EK}{\delta \theta} = Q \dots\dots\dots (3.18)$$

Q adalah gaya eksitasi dari gelombang laut, $Q = A \sin \omega t$.. (3.19)

Langrange untuk α adalah

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial EK}{\partial \dot{\alpha}}\right) + \frac{\delta EP}{\delta \alpha} - \frac{\delta EK}{\delta \alpha} = 0 \dots\dots\dots (3.20)$$

Persamaan gerak yang didapat setelah menggunakan lagrange dan setelah dilaplace kan tuntut gerakan ponton dan pendulum adalah sebagai berikut

Persamaan pertama

$$(m_1 \overline{BM^2}) s^2 \theta(s) + 2 \overline{BM} g \theta(s) = Q \dots\dots\dots (3.21)$$

Besar Q setelah dilaplacekan adalah

$$(A \cdot \sin(w \cdot t)) \text{ laplace} \rightarrow \frac{A \cdot w}{s^2 + w^2} \quad (3.22)$$

Persaman kedua pendulum sesudah dilaplacekan sebagai berikut

$$(m_2 \overline{GS^2} - m_2 \overline{GT} l_2) s^2 \theta(s) + m_2 (\overline{GS} l_2 - l_2) s^2 \alpha(s) - (2 m_2 g \overline{GT}) \theta(s) - (m_2 g l_2) \alpha(s) = 0 \dots\dots\dots (3.23)$$

Lalu persamaan pertama dan kedua dibuat matrix, seperti dibawah ini

$$\begin{pmatrix} \theta(s) \\ \alpha(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 \overline{BM^2} s^2 & 0 \\ -m_2 \overline{GT} l_2 s^2 & m_2 l_2^2 s^2 + m_2 g l_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A\omega \\ s^2 + \omega^2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

$$\begin{pmatrix} \theta(s) \\ \alpha(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A\omega}{(m_1 \overline{BM^2} s^2 + 2 \overline{g BM})(s^2 + \omega^2)} \\ \frac{A \overline{GT} l_2 m^2 s^2 \omega}{(m_2 l_2^2 s^2 + g m_2 l_2)(m_1 \overline{BM^2} s^2 + 2 \overline{g BM})(s^2 + \omega^2)} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.25)$$

Lalu dilakukan inverslaplace untuk kedua persamaan, maka persamaan gerak ponton dan pendulum adalah sebagai berikut.

$$\theta(t) = - \frac{2 A \omega \sin t \omega \sqrt{BM} g - \sqrt{2} A \omega \sin \left(\frac{\sqrt{2} t \sqrt{BM} g}{BM \sqrt{m_1}} \right) \overline{BM} \omega \sqrt{m_1}}{2 BM^2 m_1 \omega^3 \sqrt{BM} g - 4 \overline{BM} g \omega \sqrt{BM} g} \dots (3.26)$$

$$\alpha(t) = \frac{A \overline{GT} \omega ((2 g l_2) \sin \left(t \sqrt{\frac{g}{l_2}} \right) \sqrt{\frac{g}{l_2}} - 2 g l_2 \sin(t \omega) \omega + \overline{BM} g m_1 \sin(t \omega) \omega - \overline{BM} l_2 m_1 \omega^2 \sin \left(t \sqrt{\frac{g}{l_2}} \right) \sqrt{\frac{g}{l_2}} - \sqrt{2} \overline{BM} g m_1 \sin \left(\sqrt{2} t \sqrt{\frac{g}{BM m_1}} \right) \left(\sqrt{\frac{g}{BM m_1}} \right))}{\overline{BM} g (g - l_2 \omega^2) (2 g - \overline{BM} m_1 \omega^2) (2 l_2 - \overline{BM} m_1)} \dots (3.27)$$

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV berisi tentang validasi simulasi, analisis data, dan pembahasan. Analisa data yang dilakukan, pertama analisa gerak ponton terhadap variasi sarat (tinggi jukung), panjang jukung, dan variasi massa pendulum. Analisa data yang kedua, adalah pengaruh simpangan pendulum terhadap gerakan ponton dengan variasi sarat, variasi frekuensi gelombang yang datang, massa dan panjang lengan pendulum.

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan menghitung besar *error* simpangan ponton (gerakan *roll*) saat ponton terkena gelombang pada keadaan sebenarnya dan simulasi. Validasi juga dilakukan berdasarkan jumlah *meshing* pada simulasi. Nilai gerakan *Roll* dijadikan validasi pada tugas akhir ini dengan variasi sarat air $1/2 D$ dan $2/3 D$ (diameter silinder besar ponton) pada kondisi perioda gelombang 0.8 sekon.

Tabel 4.1 Validasi Hasil Simulasi

Variasi Sarat	Jumlah Mesh		Nilai Roll (Degree)		Error (%)
			Simulasi	Eksperimen	
1/2 D	Number of Node	8910	2.2072965	2.3626	7.036
	Number of Elements	8952			
	Number of Nodes (Diffracting Bodies)	3127			
	Number of Elements (Diffracting Bodies)	3068			
2/3 D	Number of Node	8798	3.469913	3.1788285	9.16
	Number of Elements	8852			
	Number of Nodes (Diffracting Bodies)	3865			
	Number of Elements (Diffracting Bodies)	3816			
Error Rata- Rata					8.098

Error rata-rata yang diperoleh adalah 8.098%, angka tersebut menjelaskan perbedaan nilai data eksperimen dan simulasi kurang dari 10% maka dianggap nilai *mesh* dan kondisi batas simulasi sudah mendekati kondisi eksperimen sehingga dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada variasi sarat air, tinggi jukung, panjang jukung ponton, dan periode gelombang.

Validasi simpangan pendulum eksperimen dan simulasi menggunakan pemodelan matematik dilakukan pada periode gelombang insiden 0.6 s dengan massa dan panjang lengan pendulum adalah 20 g dan 10.67 cm. Besar simpangan maksimal pendulum hasil eksperimen sebesar 17° dan besar simpangan pendulum hasil pemodelan matematik 14.29° derajat.

4.2 Respon Amplitude Operator (RAO) Ponton

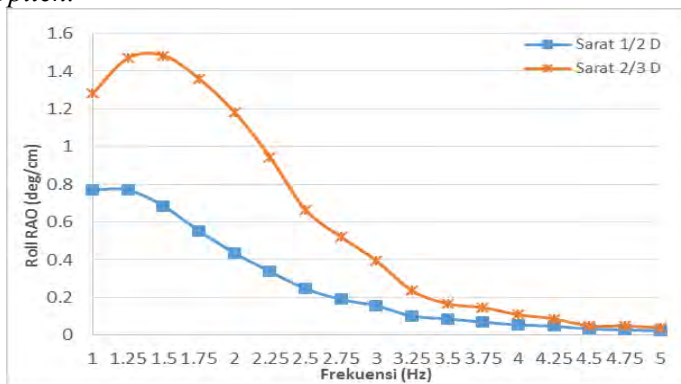
Hasil komputasi respon gerakan ponton di atas gelombang regular disusun dalam bentuk kurva RAO seperti pada gambar 4.1. Mode gerakan yang akan dianalisa, yaitu *roll*, *heave*, dan *pitch* dengan arah gelombang 90° dan amplitudo gelombang 1.5 cm. Tiga mode gerakan *Heave*, *roll*, dan *pitch* adalah tiga gerakan yang mempunyai pengaruh dominan dibandingkan tiga gerakan lain untuk bangunan laut yang mengapung bebas tanpa sistem penambatan (Djarmiko, 2012). Sehubungan dengan variasi frekuensi gelombang, komputasi telah dilakukan mulai dari frekuensi gelombang insiden 1 Hz hingga 5 Hz, bila ditinjau dari periode gelombang, sebagai kebalikannya mulai dari 0.2 sekon hingga 1 sekon. Selanjutnya akan dianalisa respon ponton pada rentang frekuensi tersebut dengan variasi sarat ponton 1/2 dan 2/3 diameter silinder besar, variasi tinggi jukung 1.5 cm dan 4 cm, variasi panjang jukung 49.5 cm dan 41.5 cm pada masing-masing mode gerakan. Matriks variasi penelitian ponton ditunjukkan pada tabel 3.1.

4.2.1 Respon Ponton dengan Variasi Sarat Air

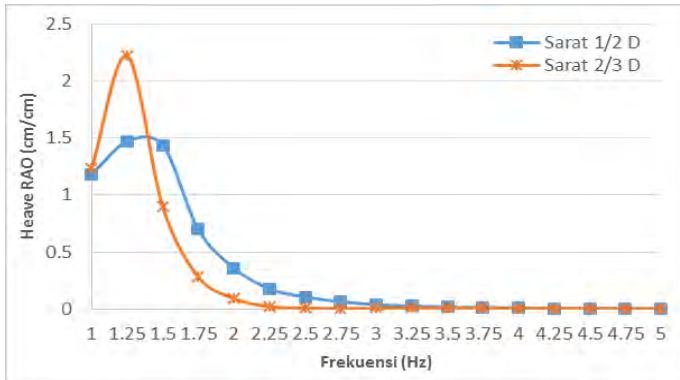
Pada penelitian ini, penulis akan menganalisa pengaruh variasi sarat terhadap respon ponton berdasarkan grafik gerakan *roll*, *heave*, dan *pitch Response Amplitude Operator* (RAO) yang

dilakukan mulai dari frekuensi insiden gelombang 1 Hz sampai dengan 5 Hz pada gelombang regular dengan amplitudo gelombang 1.5 cm. Analisa pengaruh sarat dilakukan pada variasi ponton ke- 1 dan ke- 9, yaitu pada panjang jukung 49.5 cm, beban pendulum 40.6 gram, dan panjang lengan pendulum 16.5 cm. Tabel variasi ponton dapat dilihat lebih rinci pada bab 3, table 3.1.

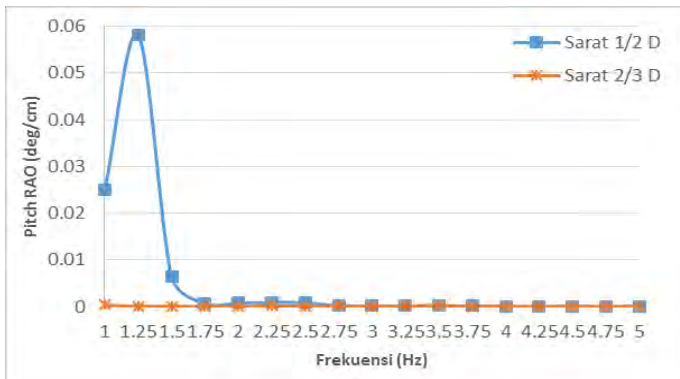
Pola respon gerakan *roll* dan *heave* menunjukkan pola yang serupa untuk sarat 1/2 ataupun 2/3 diameter. RAO gerakan *roll* dan *heave* pada sarat 2/3 diameter lebih besar dibandingkan dengan *roll* dan *heave* pada sarat 1/2 diameter. Hal ini bersesuaian dengan semakin tingginya lambung kapal dari posisi *keel* yang terkena air maka besar gerakan *rolling* akan semakin meningkat (Yoshiho Ikeda, 2012). Selain itu juga, semakin tinggi sarat air kapal maka gerakan *heave* yang dihasilkan juga semakin meningkat (Andrian, 2010). Respon gerakan *pitch* serupa dengan respon gerakan *roll* dan *heave*, namun gerakan *pitch* memiliki nilai yang kecil dibandingkan *roll* dan *heave* hal ini terjadi disebabkan karena gelombang datang dari arah 90° sehingga gerakan *pitch* menjadi tidak dominan. Gerakan *pitch* pada sarat 2/3 D sangat kecil, tetapi jika dilihat dari skala yang lebih kecil akan diperoleh *tren* garis yang sama dengan gerakan *roll*, *heave*, dan *pitch*.



Gambar 4. 1 Roll RAO Variasi Ketinggian Sarat Air



Gambar 4. 2 Heave RAO Variasi Ketinggian Sarat Air



Gambar 4. 3 Pitch RAO Variasi Ketinggian Sarat Air

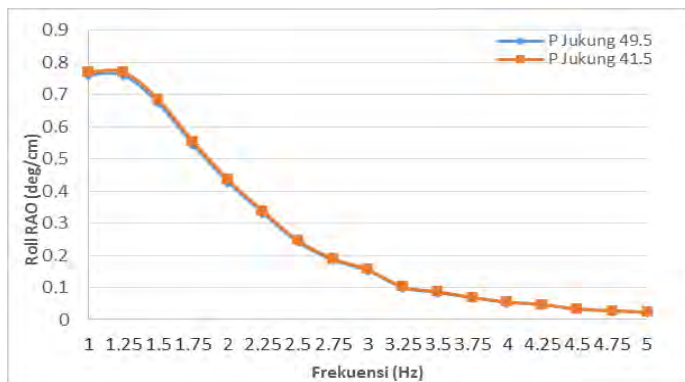
Grafik diatas terlihat respon gerakan (RAO) *roll*, *heave*, dan *pitch* pada sarat 1/2 maupun 2/3 setelah melewati frekuensi sekitar 1.25 Hz – 1.5 Hz mengalami penurunan, artinya jika ponton diletakkan pada frekuensi yang bertambah besar atau periode kecil maka respon gerakan akan semakin mengecil. Jadi, dengan frekuensi yang besar atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek ponton bergerak diatas air yang relatif datar (Djatkiko, 2012). Pada gambar 4.2 gerakan *heave* mengalami penurunan yang tajam setelah melewati frekuensi gelombang 1.25 Hz sama halnya

dengan gerakan *pitch* gambar 4.3, sedangkan pada gambar 4.1 nilai *roll* mengalami penurunan yang landai, ini dapat disimpulkan jika ponton diletakkan pada frekuensi gelombang diatas 1.25 Hz gerakan *roll* akan lebih dominan dibandingkan dengan gerakan *heave*, sedangkan gerakan *pitch* tetap lebih kecil dibandingkan dengan gerakan *roll* dan *heave*.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, pendulum vertikal pada penelitian ini bergerak pada arah sumbu-y dengan arah gelombang datang 90^0 . Hal ini menyebabkan mode gerakan *roll* ponton menjadi lebih dominan untuk menggerakkan pendulum. Oleh karena itu, mengacu pada grafik RAO gerakan *roll* diatas maka ponton lebih tepat jika diletakkan pada frekuensi gelombang datang sebesar 1 Hz - 1.75 Hz.

4.2.2 Respon Ponton dengan Variasi Panjang Jukung

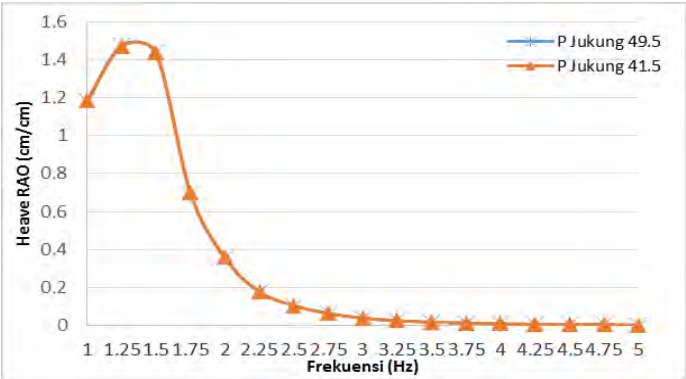
Analisa pengaruh panjang jukung dengan variasi 49.5 cm dan 41.5 cm (variasi 2 dan 6 ponton) terhadap gerakan *roll*, *heave*, dan *pitch* ponton dilakukan pada sarat 1/2 diameter dapat dilihat pada gambar 4.4. Pengaruh variasi panjang jukung terhadap gerakan *Roll*, *heave*, dan *pitch* sangat kecil, dilihat dari *tren* garis yang berhimpit.



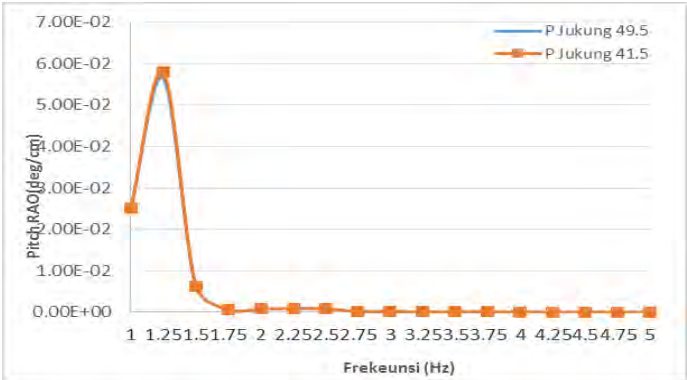
(a)

Jika ponton dengan panjang jukung 49.5 cm berada pada frekuensi gelombang laut 1.25 Hz besar sudut *rolling* adalah 0.75

deg/cm dan *heaving* 1.4757 cm/cm, ponton dengan panjang jukung 41.5 cm besar sudut *rolling* adalah 0.77 deg/cm dan *heaving* adalah 1.47153 cm/cm. Dapat disimpulkan jukung yang lebih pendek, 41.5 cm, menghasilkan gerakan *rolling*, *heaving*, *pitching* yang lebih besar walaupun perbedaan gerakan ini tidak telalu signifikan dengan panjang jukung 49.5 cm.



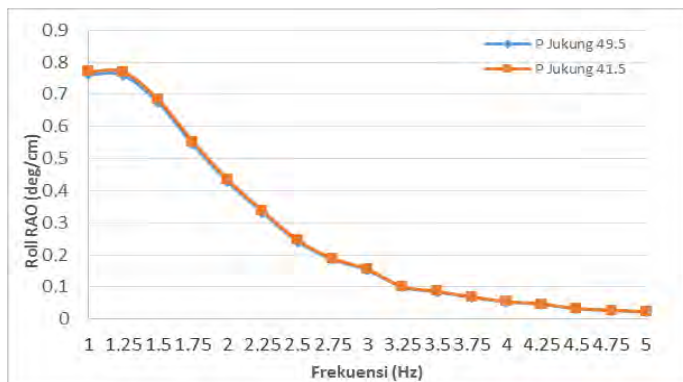
(b)



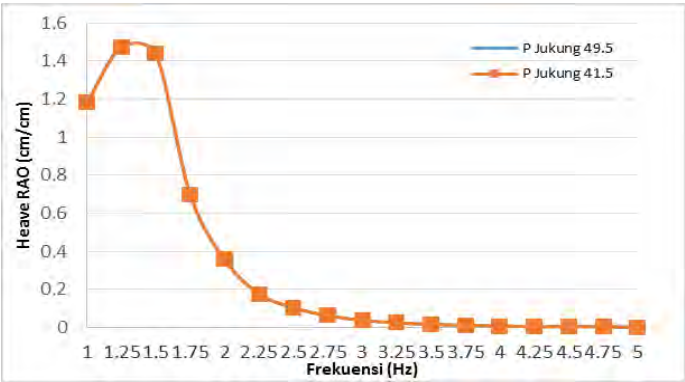
(c)

Gambar 4. 4 Gerakan Ponton Variasi Panjang Jukung pada Sarat $\frac{1}{2}$ D. (a) Roll (b) Heave (c) Pitch

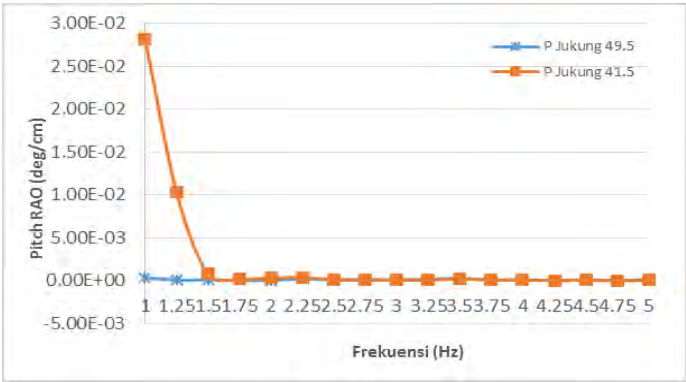
Gambar 4.5 adalah respon gerakan ponton *roll*, *heave*, dan *pitch* variasi panjang jukung pada sarat 2/3 diameter (variasi ke 11 dan 15). Pengaruh variasi panjang jukung terhadap gerakan *Roll* sangat kecil, dilihat dari *tren* garis yang berhimpit. Jika ponton dengan panjang jukung 49.5 cm berada pada frekuensi gelombang laut 1.25 Hz besar sudut *rolling* adalah 1.46 deg/cm dan *heaving* 2.1978 cm/cm, ponton dengan panjang jukung 41.5 cm besar sudut *rolling* adalah 1.47 deg/cm dan *heaving* adalah 2.292 cm/cm. Dapat disimpulkan jukung yang lebih pendek, 41.5 cm, menghasilkan gerakan *rolling* dan *heaving* yang lebih besar walaupun perbedaan gerakan ini tidak terlalu signifikan dengan panjang jukung 49.5 cm. Pada gerakan *pitching* untuk panjang jukung 49.5 cm dan 41.5 juga memiliki perbedaan yang kecil, tetapi nilai RAO *pitch* pada frekuensi 1 Hz yang berbeda, artinya pada panjang jukung 41.5 pada frekuensi 1 Hz ponton bergerak lebih besar, tetapi nilai *pitching* kecil dibanding dua gerak yang lain.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 5 Gerakan Ponton Variasi Panjang Jukung pada Sarat 2/3 D. (a) *Roll* (b) *Heave* (c) *Pitch*

Hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan semakin panjang jukung maka nilai RAO *roll* akan semakin kecil karena dengan bertambahnya panjang jukung maka ponton akan menjadi

lebih stabil. Hal ini sesuai dengan prinsip kapal trimaran yang memiliki konfigurasi lambung kapal yang terpisah menghasilkan stabilitas yang baik dengan sudut akselerasi gerakan *rolling* yang kecil dengan panjang jukung yang lebih panjang (Sari, 2012) dan menurut D.R Berrett dan C.B Barrass (1999) dengan memperbesar lebar kapal (panjang kapal dianggap tetap), maka kapal akan semakin stabil.

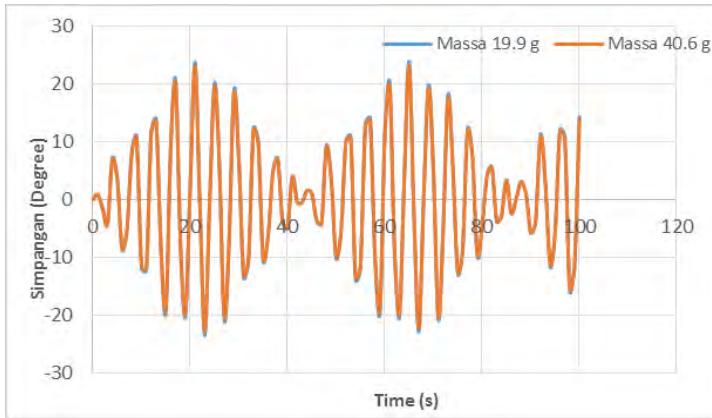
4.3 Analisa Gerakan Pendulum

Respon gerak pendulum didapat dari model matematik satu derajat kebebasan ponton dan satu derajat kebebasan pendulum. Dengan menemukan persamaan gerak untuk pendulum maka diplot grafik respon pendulum berupa simpangan pendulum. Analisa gerak pendulum akan dilakukan berdasarkan variasi massa pendulum, yaitu 40.6 gram dan 19.9 gram, variasi panjang lengan pendulum, yaitu 16.5 cm dan 10.67 cm, yang diletakkan pada ponton dengan variasi sarat air $\frac{1}{2}$ dan $\frac{2}{3}$ diameter silinder besar ponton. Rincian variasi dapat dilihat di tabel 3.2

4.3.1 Gerak Pendulum Variasi massa

Pada analisa ini akan dijelaskan hasil gerak pendulum dengan variasi massa 40.6 gram dan 19.9 gram yang diletakkan pada ponton dengan sarat air $\frac{2}{3}$ diameter (Gambar 4.7) dengan periode gelombang sebesar 0.8 s

Mengacu pada variasi 21 dan 23 pendulum (dapat dilihat pada tabel 3.2) terlihat grafik yang menggambarkan hubungan waktu dan simpangan dengan dua variasi massa. Semakin besar massa pendulum maka simpangan yang dihasilkan pendulum semakin kecil. Massa pendulum 19.9 gram mempunyai simpangan maksimum 14.375^0 , sedangkan massa 40.6 gram mempunyai simpangan maksimum 13.93^0 .



Gambar 4. 6 Respon Pendulum Variasi Massa

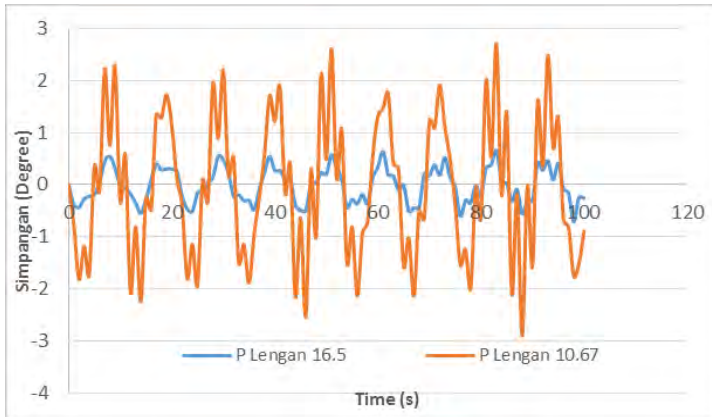
4.3.2 Gerak Pendulum Variasi Panjang Lengan Pendulum

Pada analisa ini akan dijelaskan hasil gerak pendulum dengan variasi panjang lengan pendulum 16.5 cm dan 10.67 cm yang diletakkan pada ponton dengan sarat air $\frac{1}{2}$ diameter (Gambar 4.9) dan sarat air $\frac{2}{3}$ diameter silinder besar ponton (Gambar 4.10) dengan variasi periode gelombang 0.4 s, 0.6 s, dan 0.8 s dan massa pendulum 40.6 g dibuat tetap.

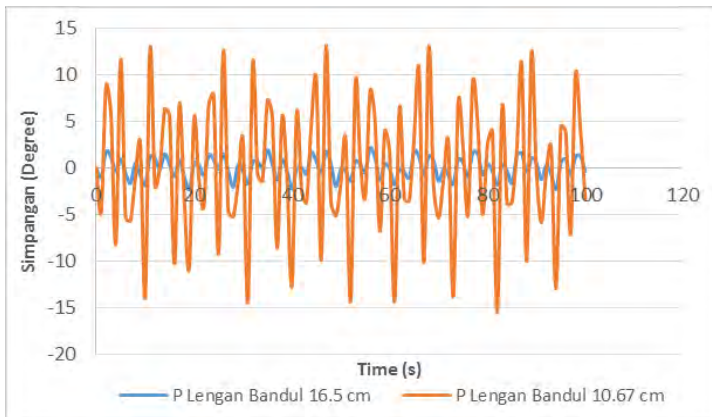
Gambar dibawah ini adalah grafik simpangan pendulum dengan variasi panjang lengan pada frekuensi gelombang 0.4 s (variasi pendulum ke- 1 dan 2), 0.6 s (variasi pendulum ke-5 dan 6), dan 0.8 s (variasi pendulum ke-9 dan 10) pada sarat ponton $\frac{1}{2}$ diameter silinder besar. Tabel variasi pendulum dapat dilihat pada tabel 3.2.

Berdasarkan respon hasil penurunan rumus model matematik, gerakan pendulum pada ponton dengan sarat $\frac{1}{2}$ diameter silinder besar, jika diletakkan pada gelombang berperiode 0.4 s, 0.6 s, dan 0.8 s memiliki gerakan yang serupa. Lengan pendulum 16.5 cm menghasilkan simpangan yang kecil dibandingkan dengan panjang lengan 10.67 cm. Sesuai dengan persamaan (2.3) dimana panjang pendulum berbanding lurus dengan periode pendulum, lengan pendulum yang semakin panjang maka periode pendulum akan semakin panjang dan sudut

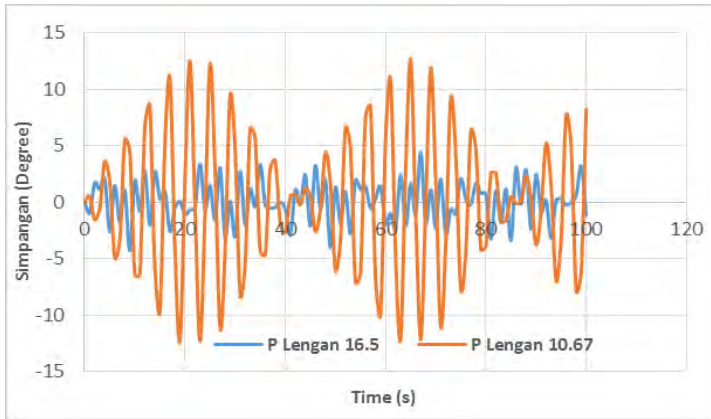
yang dibentuk pendulum dari posisi tetapnya akan semakin kecil. Besar simpangan maksimal pendulum dengan panjang lengan 10.67 cm pada periode gelombang 0.4 s adalah 2.7° , sedangkan jika periode gelombang yang datang 0.6 s simpangan maksimal pendulum adalah 13.13° . Besar simpangan maksimal pendulum dengan panjang lengan 10.67 cm pada periode 0.8 s adalah 12.63°



(a)



(b)

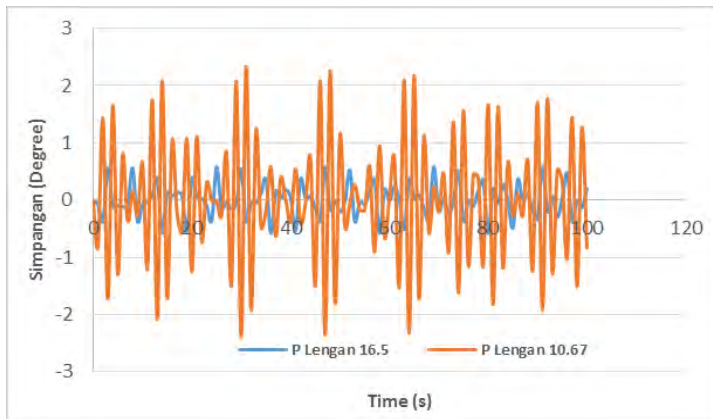


(c)

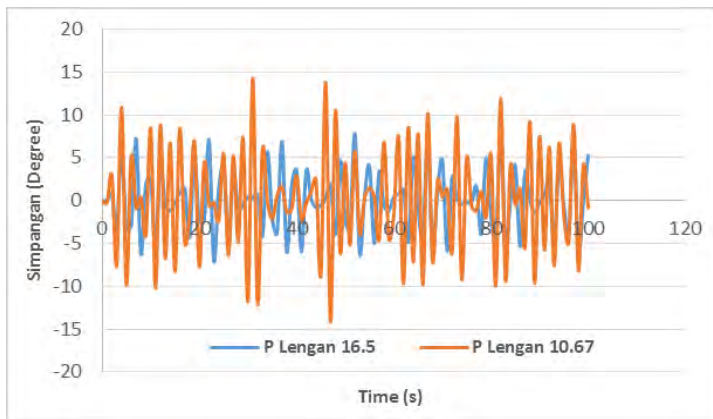
Gambar 4. 7 (a) Respon Pendulum Sarat 1/2 Variasi Lengan Pendulum dengan Periode Gelombang 0.4 s. (b) 0.6 s. (c) 0.8 s.

Simpangan pendulum untuk ponton dengan sarat air $2/3$ diameter silinder besar dan periode gelombang 0.4 s adalah 2.33° . Jika pada periode gelombang 0.6 s, besar simpangan maksimal pendulum adalah 14.29° . Simpangan maksimal pendulum pada periode gelombang 0.8 s adalah sebesar 23.9° . Sesuai dengan persamaan (2.3) dimana panjang pendulum berbanding lurus dengan periode pendulum, lengan pendulum yang semakin panjang maka periode gelombang akan semakin panjang dan sudut yang dibentuk pendulum dari posisi tetapnya akan semakin kecil.

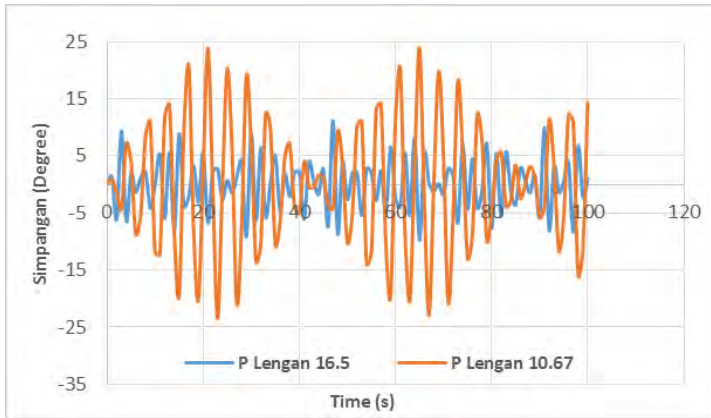
Berdasarkan analisa pengaruh variasi sarat, variasi panjang lengan pendulum, dan variasi frekuensi gelombang yang datang, dapat disimpulkan pendulum yang diletakkan pada sarat $2/3$ akan menghasilkan simpangan yang lebih besar, sesuai dengan analisa 4.1 mengenai pengaruh gerakan ponton terhadap variasi sarat. Periode gelombang yang semakin besar maka akan menyebabkan simpangan pendulum yang semakin besar pula. Serta, panjang lengan pendulum yang lebih pendek akan menyebabkan simpangan yang lebih besar pula.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 8 Respon Pendulum Sarat 2/3 Variasi Lengan Pendulum dengan Periode Gelombang (a) 0.4 s. (b) 0.6 s. (c) 0.8 s.

4.4 Pembahasan

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut- Sistem Bandul (PLTGL-SB) merupakan salah satu teknologi konversi energi terbarukan dari gerakan gelombang laut yang akan menjadi gaya eksitasi pendulum, dimana pendulum nanti akan menghasilkan simpangan yang akan dikonversikan menjadi energi listrik. Penelitian tugas akhir ini menggunakan ponton yang terdiri dari silinder besar dan dua silinder kecil sebagai cadik, seperti kapal trimaran. Untuk menjawab tujuan dari tugas akhir kali ini maka dilakukan simulasi gerakan ponton pada Ansys AQWA untuk menentukan olah gerak ponton yang terbaik untuk PLTGL-SB, lalu untuk mengetahui simpangan pendulum dilakukan *modelling* matematik satu DOF ponton (*pitch*) dan satu DOF pendulum. Variasi yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah variasi sarat ponton, yaitu 1/2 dan 2/3 diameter silinder ponton, panjang cadik 49.5 cm dan 41.5 cm, massa pendulum 40.6 gram dan 19.9 gram, dan panjang lengan pendulum 49.5 cm dan 41.5 cm dengan amplitudo gelombang yang digunakan 1.5 cm, arah gelombang 90^0 , dan rentang frekuensi gelombang 1 Hz- 5 Hz.

Hasil simulasi variasi panjang jukung, dengan panjang yang lebih panjang (49.9 cm) gerakan *rolling* yang didapat lebih kecil sesuai dengan prinsip pendekatan prinsip kapal trimaran (karena ponton bentuk ponton seperti kapal trimaran) dimana memiliki konfigurasi lambung kapal yang terpisah menghasilkan stabilitas yang baik dengan sudut akselerasi gerakan *rolling* yang kecil dengan panjang jukung yang lebih panjang (Sari, 2012).

Hasil simulasi dengan variasi sarat $\frac{1}{2}$ dan $\frac{2}{3}$ diameter silinder besar ponton didapat untuk mendapat olah gerak ponton terbaik berdasarkan grafik RAO, maka gerak terbaik pada sarat $\frac{2}{3}$ diameter. Hal ini bersesuaian dengan semakin tingginya lambung kapal dari posisi *keel* yang terkena air maka besar gerakan *rolling* akan semakin meningkat (Yoshiho Ikeda, 2012). Selain itu juga, semakin tinggi sarat air kapal maka gerakan *heave* yang dihasilkan juga semakin meningkat (Andrian, 2010).

Untuk mendapatkan simpangan pendulum, maka dilakukan pemodelan matematik dan didapatkan persamaan gerak pendulum dengan satu DOF ponton (*roll*) dan satu DOF pendulum. Hasil plot respon pendulum variasi massa maka didapat massa yang lebih besar maka simpangan yang dihasilkan semakin besar kecil. Hasil plot respon pendulum variasi panjang lengan didapat lengan yang lebih panjang akan menghasilkan simpangan pendulum yang lebih kecil, sesuai dengan teori persamaan 2.3.

Maka dari itu untuk mendapatkan gerakan ponton terbaik dapat disimpulkan ponton dengan panjang jukung 41.5 cm, sarat air $\frac{2}{3}$ diameter, dan diletakkan pada periode gelombang 0.8 s akan menghasilkan olah gerak ponton yang baik sehingga cocok untuk PLTGL-SB dengan massa bandul 19.9 gram, dan lengan pendulum yang pendek, yaitu 10.67 cm agar menghasilkan simpangan yang lebih besar.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sesuai dengan tujuan awal dari penelitian ini, yaitu mengetahui bentuk ponton terbaik untuk PLTGL-SB dan mengetahui simpangan terbesar yang dihasilkan pendulum akibat gaya eksitasi ponton dalam skala laboratorium, maka dari hasil analisa yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Bentuk ponton terbaik untuk PLTGL-SB berdasarkan hasil, yaitu pada ponton dengan tinggi sarat $2/3$ diameter silinder besar ponton atau dengan tinggi jukung 1.5 cm dan panjang jukung 41.5 cm. Berdasarkan grafik respon (RAO), ponton skala laboratorium pada penelitian ini akan menghasilkan gerakan maksimal untuk menggerakkan pendulum jika diletakkan pada frekuensi gelombang 1 Hz – 1.75 Hz.
2. Simpangan terbesar pendulum dihasilkan jika ponton diletakkan pada periode gelombang 0.8 s atau frekuensi 1.25 Hz, dengan massa dan lengan pendulum sebesar 19.9 g dan 10.67 cm dengan nilai simpangan terbesar adalah 23.5^0 .

5.2 Saran

Penelitian ini masih perlu dilakukan pengembangan, maka saran yang disampaikan dalam laporan tugas akhir ini adalah

1. Perbandingan variasi panjang jukung diharapkan lebih besar agar memberikan efek yang signifikan terhadap gerakan ponton.
2. Derajat kebebasan ponton perlu diperluas agar pemodelan matematik untuk mendapatkan simpangan pendulum lebih sesuai dengan keadaan aslinya (eksperimen).
3. Pemodelan matematis pendulum dapat diperluas dengan tidak mengasumsikan gerakan pendulum pada keadaan harmonik agar simpangan pendulum yang dihasilkan sesuai dengan keadaan sebenarnya (eksperimen).

DAFTAR PUSTAKA

- Beier, K.P., “NA-302: Static Stability and Marine Vehucles”,Lecture Notes, The Department of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, 1986
- Lukman T., “*Kemantapan Benda Terapung*”, 2004.
- Barras, B., & Derrett, D. (2006). Ship Stability for Master and Mates. England: Stanford Maritime.
- Mutedjo. (1999). Teori Bangunan Kapal 1.
- Andersen, Lykke Thomas, “*Water Wave Mechanics*”,Lecture Notes. Department of Civil Engineering, Aalborg University
- D. Dimargonas, Andrew, “*Vibration for Engineers*”, Prentice Hall PTR, New jersey, (2002).
- Craig Jr., Roy R.. *Structural Dynamic An Introduction to Computer Methods*. Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics in The University of Texas. Austin. (1981).
- Adelia Viviany.S, I. R. (2012). Evaluasi Unjuk Kerja Crane Barge KGM-23 Pada Saat Operasi Pengangkatan dan Pemasangan Boom Burner di Lokasi Peciko Field Platform MWP-B Total E&P Indonesié. *JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, (2012) 1-6*, 1-6.
- Ferial. (2015, September 2). Retrieved from Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi Web Site: <http://ebtke.esdm.go.id>
- Fatnanta, F. (2009), “ Kajian Perilaku Transmisi dan Stabilitas Pemecah Gelombang Kantong Pasir tipe Tenggelam “. Disertasi., ITS Surabaya
- Cahyadi, J. A. (2014).Studi Eksperimental Pengaruh Bentuk Pelampung pada Mekanisme PLTGL Metode Pelampung Terhadap Energi Listrik yang Dihasilkan. Jurusan Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

- Nimalasari, Putu. (2014). Studi Eksperimen dan Analisis ENegi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme PLTGL-SB Metode Ponton dan Single Pendulum. Jurusan Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Rodrigues, L. (2010). Wave power conversion systems for electrical energy production. *Wave power conversion systems for electrical energy production*, 3-7.
- Hongda Shi, F. C. (2014). Theoretical study on the power take-off estimation of heaving buoy. *Renewable Energy*, 441-448.
- K.S. Choi, D.S. Yang, S.Y. Park, B.H. Cho, Design and performance test of hydraulic PTO for wave energy converter, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 13 (5) (2012) 795-801

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A SIMULASI PONTON

Detail variasi simulasi ponton dengan 16 variasi sebagaimana tabel dibawah ini.

Tabel 1. Variasi Ponton

Variasi	Sarat	Tinggi Jukung (cm)	Panjang Jukung (cm)	Lengan Pendulum (cm)	Massa Pendulum (gr)
1	1/2 D	4	49.5	16.5	40.6
2	1/2 D	4	49.5	16.5	19.9
3	1/2 D	4	49.5	10.67	40.6
4	1/2 D	4	49.5	10.67	19.9
5	1/2 D	4	41.5	16.5	40.6
6	1/2 D	4	41.5	16.5	19.9
7	1/2 D	4	41.5	10.67	40.6
8	1/2 D	4	41.5	10.67	19.9
9	2/3 D	1.5	49.5	16.5	40.6
10	2/3 D	1.5	49.5	16.5	19.9
11	2/3 D	1.5	49.5	10.67	40.6
12	2/3 D	1.5	49.5	10.67	19.9
13	2/3 D	1.5	41.5	16.5	40.6
14	2/3 D	1.5	41.5	16.5	19.9
15	2/3 D	1.5	41.5	10.67	40.6
16	2/3 D	1.5	41.5	10.67	19.9

Besar nilai RAO masing- masing variasi sebagaimana dipaparkan pada tabel 2.

Tabel 2. Nilai RAO 16 Variasi Ponton

Variasi 1				Variasi 2				Variasi 3			
Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)
1	0.7710827	2.50E-02	1.1819936	1	0.7620907	2.53E-02	1.1836569	1	0.7973479	2.63E-02	1.1874211
1.25	0.7700849	5.81E-02	1.4715314	1.25	0.7595608	5.65E-02	1.4757034	1.25	0.800234	5.22E-02	1.4851606
1.5	0.6848896	6.37E-03	1.4381938	1.5	0.6744276	6.29E-03	1.4357318	1.5	0.7136775	6.08E-03	1.4300362
1.75	0.5535537	6.58E-04	0.6997018	1.75	0.544628	6.58E-04	0.6969343	1.75	0.5788958	6.46E-04	0.6907843
2	0.4355453	8.11E-04	0.3585164	2	0.4281776	8.09E-04	0.3573085	2	0.4564058	7.96E-04	0.3546259
2.25	0.3377417	9.29E-04	0.1769895	2.25	0.3317957	9.26E-04	0.1764989	2.25	0.3543259	9.17E-04	0.1754093
2.5	0.2464703	8.53E-04	0.1044456	2.5	0.2420129	8.52E-04	0.1041983	2.5	0.258799	8.55E-04	0.1036487
2.75	0.1895607	2.19E-04	6.26E-02	2.75	0.1860679	2.19E-04	6.25E-02	2.75	0.1991952	2.20E-04	6.22E-02
3	0.1559579	1.90E-04	3.85E-02	3	0.1530398	1.90E-04	3.84E-02	3	0.163966	1.91E-04	3.82E-02
3.25	0.1018923	1.27E-04	2.46E-02	3.25	1.00E-01	1.28E-04	2.46E-02	3.25	0.1071812	1.33E-04	2.45E-02
3.5	8.69E-02	1.55E-04	1.64E-02	3.5	8.52E-02	1.55E-04	1.64E-02	3.5	9.14E-02	1.59E-04	1.63E-02
3.75	6.92E-02	1.87E-04	1.24E-02	3.75	6.79E-02	1.87E-04	1.24E-02	3.75	7.29E-02	1.88E-04	1.24E-02
4	5.49E-02	7.73E-05	7.87E-03	4	5.38E-02	7.75E-05	7.86E-03	4	5.78E-02	7.85E-05	7.83E-03
4.25	4.76E-02	2.59E-05	5.59E-03	4.25	4.67E-02	2.58E-05	5.58E-03	4.25	5.01E-02	2.57E-05	5.56E-03
4.5	3.31E-02	5.68E-05	4.28E-03	4.5	3.25E-02	5.69E-05	4.27E-03	4.5	3.49E-02	5.76E-05	4.26E-03
4.75	2.82E-02	4.80E-05	4.13E-03	4.75	2.77E-02	4.81E-05	4.13E-03	4.75	2.97E-02	4.86E-05	4.11E-03
5	2.32E-02	3.60E-05	5.08E-04	5	2.27E-02	3.61E-05	5.07E-04	5	2.44E-02	3.67E-05	5.05E-04

Variasi 4				Variasi 5				Variasi 6			
Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)
1	0.7620907	2.53E-02	1.1836569	1	0.7973495	2.60E-02	1.185747	1	7.71E-01	2.50E-02	1.181994
1.25	0.7595608	5.65E-02	1.4757034	1.25	0.8003659	5.35E-02	1.4809526	1.25	7.70E-01	5.81E-02	1.471531
1.5	0.6744276	6.29E-03	1.4357318	1.5	0.7140091	6.16E-03	1.4326057	1.5	6.85E-01	6.37E-03	1.438194
1.75	0.544628	6.58E-04	0.6969343	1.75	0.5791442	6.46E-04	0.6935103	1.75	5.54E-01	6.58E-04	0.699702
2	0.4281776	8.09E-04	0.3573085	2	0.4566621	7.98E-04	0.3558153	2	4.36E-01	8.11E-04	0.358516
2.25	0.3317957	9.26E-04	0.1764989	2.25	0.3545857	9.20E-04	0.1758931	2.25	3.38E-01	9.29E-04	0.17699
2.5	0.2420129	8.52E-04	0.1041983	2.5	0.2590175	8.55E-04	0.103893	2.5	2.46E-01	8.53E-04	0.104446
2.75	0.1860679	2.19E-04	6.25E-02	2.75	0.199374	2.20E-04	6.23E-02	2.75	1.90E-01	2.19E-04	6.26E-02
3	0.1530398	1.90E-04	3.84E-02	3	0.1641225	1.91E-04	3.83E-02	3	1.56E-01	1.90E-04	3.85E-02
3.25	1.00E-01	1.28E-04	2.46E-02	3.25	0.1072891	1.32E-04	2.45E-02	3.25	1.02E-01	1.27E-04	2.46E-02
3.5	8.52E-02	1.55E-04	1.64E-02	3.5	9.15E-02	1.59E-04	1.63E-02	3.5	8.69E-02	1.55E-04	1.64E-02
3.75	6.79E-02	1.87E-04	1.24E-02	3.75	7.30E-02	1.88E-04	1.24E-02	3.75	6.92E-02	1.87E-04	1.24E-02
4	5.38E-02	7.75E-05	7.86E-03	4	5.78E-02	7.83E-05	7.84E-03	4	5.49E-02	7.73E-05	7.87E-03
4.25	4.67E-02	2.58E-05	5.58E-03	4.25	5.02E-02	2.58E-05	5.57E-03	4.25	4.76E-02	2.59E-05	5.59E-03
4.5	3.25E-02	5.69E-05	4.27E-03	4.5	3.49E-02	5.75E-05	4.26E-03	4.5	3.31E-02	5.68E-05	4.28E-03
4.75	2.77E-02	4.81E-05	4.13E-03	4.75	2.97E-02	4.86E-05	4.12E-03	4.75	2.82E-02	4.80E-05	4.13E-03
5	2.27E-02	3.61E-05	5.07E-04	5	2.44E-02	3.66E-05	5.06E-04	5	2.32E-02	3.60E-05	5.08E-04

Variasi 7				Variasi 8				Variasi 9			
Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)
1	0.807134	2.60E-02	1.185748	1	0.771083	2.50E-02	1.181994	1	1.281343	3.78E-04	1.233759
1.25	0.811862	5.35E-02	1.480956	1.25	0.770085	5.81E-02	1.471531	1.25	1.470084	7.26E-05	2.221648
1.5	0.725321	6.16E-03	1.43261	1.5	0.68489	6.37E-03	1.438194	1.5	1.483167	9.65E-05	0.89883
1.75	0.588942	6.46E-04	0.693513	1.75	0.553554	6.58E-04	0.699702	1.75	1.360688	4.10E-05	0.282755
2	0.464756	7.98E-04	0.355817	2	0.435545	8.11E-04	0.358516	2	1.183117	3.14E-05	9.21E-02
2.25	0.361086	9.20E-04	0.175894	2.25	0.337742	9.29E-04	0.17699	2.25	0.945508	2.05E-04	2.03E-02
2.5	0.263883	8.55E-04	0.103894	2.5	0.24647	8.53E-04	0.104446	2.5	0.664798	8.11E-05	8.84E-03
2.75	0.203188	2.20E-04	6.23E-02	2.75	0.189561	2.19E-04	6.26E-02	2.75	0.521863	1.23E-04	3.12E-03
3	0.167306	1.91E-04	3.83E-02	3	0.155958	1.90E-04	3.85E-02	3	0.395314	7.87E-05	6.54E-03
3.25	0.109395	1.32E-04	2.45E-02	3.25	0.101892	1.27E-04	2.46E-02	3.25	0.236316	1.42E-04	7.48E-03
3.5	9.33E-02	1.59E-04	1.63E-02	3.5	8.69E-02	1.55E-04	1.64E-02	3.5	0.166708	2.82E-04	7.48E-03
3.75	7.44E-02	1.88E-04	1.24E-02	3.75	6.92E-02	1.87E-04	1.24E-02	3.75	0.146347	6.57E-05	7.31E-03
4	5.90E-02	7.83E-05	7.84E-03	4	5.49E-02	7.73E-05	7.87E-03	4	0.109156	9.21E-05	5.28E-03
4.25	5.12E-02	2.58E-05	5.57E-03	4.25	4.76E-02	2.59E-05	5.59E-03	4.25	8.70E-02	4.71E-05	4.57E-03
4.5	3.56E-02	5.75E-05	4.26E-03	4.5	3.31E-02	5.68E-05	4.28E-03	4.5	4.99E-02	1.10E-04	3.93E-03
4.75	3.03E-02	4.86E-05	4.12E-03	4.75	2.82E-02	4.80E-05	4.13E-03	4.75	4.87E-02	2.81E-05	2.89E-03
5	2.49E-02	3.66E-05	5.06E-04	5	2.32E-02	3.60E-05	5.08E-04	5	3.97E-02	1.09E-04	2.59E-03

Variasi 10				Variasi 11				Variasi 12			
Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)
1	1.274296	3.95E-04	1.228854	1	1.274296	3.95E-04	1.228854	1	1.274296	3.95E-04	1.228854
1.25	1.460494	7.56E-05	2.197899	1.25	1.460494	7.56E-05	2.197899	1.25	1.460494	7.56E-05	2.197899
1.5	1.472183	9.34E-05	0.90994	1.5	1.472183	9.34E-05	0.90994	1.5	1.472183	9.34E-05	0.90994
1.75	1.349428	4.08E-05	0.284795	1.75	1.349428	4.08E-05	0.284795	1.75	1.349428	4.08E-05	0.284795
2	1.172046	3.40E-05	9.26E-02	2	1.172046	3.40E-05	9.26E-02	2	1.172046	3.40E-05	9.26E-02
2.25	0.935581	2.08E-04	2.04E-02	2.25	0.935581	2.08E-04	2.04E-02	2.25	0.935581	2.08E-04	2.04E-02
2.5	0.657266	8.15E-05	8.88E-03	2.5	0.657266	8.15E-05	8.88E-03	2.5	0.657266	8.15E-05	8.88E-03
2.75	0.515579	1.24E-04	3.13E-03	2.75	0.515579	1.24E-04	3.13E-03	2.75	0.515579	1.24E-04	3.13E-03
3	0.39033	7.94E-05	6.56E-03	3	0.39033	7.94E-05	6.56E-03	3	0.39033	7.94E-05	6.56E-03
3.25	0.233261	1.42E-04	7.51E-03	3.25	0.233261	1.42E-04	7.51E-03	3.25	0.233261	1.42E-04	7.51E-03
3.5	0.164498	2.81E-04	7.51E-03	3.5	0.164498	2.81E-04	7.51E-03	3.5	0.164498	2.81E-04	7.51E-03
3.75	0.144378	6.54E-05	7.33E-03	3.75	0.144378	6.54E-05	7.33E-03	3.75	0.144378	6.54E-05	7.33E-03
4	0.10767	9.24E-05	5.29E-03	4	0.10767	9.24E-05	5.29E-03	4	0.10767	9.24E-05	5.29E-03
4.25	8.58E-02	4.72E-05	4.59E-03	4.25	8.58E-02	4.72E-05	4.59E-03	4.25	8.58E-02	4.72E-05	4.59E-03
4.5	4.92E-02	1.07E-04	3.94E-03	4.5	4.92E-02	1.07E-04	3.94E-03	4.5	4.92E-02	1.07E-04	3.94E-03
4.75	4.80E-02	2.82E-05	2.90E-03	4.75	4.80E-02	2.82E-05	2.90E-03	4.75	4.80E-02	2.82E-05	2.90E-03
5	3.91E-02	1.09E-04	2.60E-03	5	3.91E-02	1.09E-04	2.60E-03	5	3.91E-02	1.09E-04	2.60E-03

Variasi 13				Variasi 14				Variasi 15			
Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)	Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)
1	1.287346	2.90E-02	1.236348	1	1.279579	2.99E-02	1.231553	1	1.28728	2.82E-02	1.236348
1.25	1.475565	1.04E-02	2.119219	1.25	1.464783	1.05E-02	2.098153	1.25	1.475375	1.03E-02	2.119218
1.5	1.473515	8.17E-04	0.970141	1.5	1.461316	8.49E-04	0.98203	1.5	1.473392	8.17E-04	0.970141
1.75	1.340069	2.06E-04	0.319577	1.75	1.327728	2.12E-04	0.321944	1.75	1.340147	1.99E-04	0.319577
2	1.157671	3.27E-04	0.112992	2	1.145991	3.30E-04	0.113601	2	1.158081	3.23E-04	0.112992
2.25	0.929885	3.71E-04	3.17E-02	2.25	0.919679	3.74E-04	3.18E-02	2.25	0.930492	3.67E-04	3.17E-02
2.5	0.655167	1.35E-04	1.64E-02	2.5	0.647474	1.34E-04	1.65E-02	2.5	0.655683	1.36E-04	1.64E-02
2.75	0.516123	8.61E-05	2.28E-03	2.75	0.509735	8.68E-05	2.29E-03	2.75	0.516583	8.53E-05	2.28E-03
3	0.39796	7.61E-05	2.88E-03	3	0.39282	7.67E-05	2.90E-03	3	0.398338	7.54E-05	2.88E-03
3.25	0.244503	7.76E-05	5.14E-03	3.25	0.24125	7.53E-05	5.15E-03	3.25	0.244736	7.91E-05	5.14E-03
3.5	0.195989	1.98E-04	5.74E-03	3.5	0.193316	1.96E-04	5.75E-03	3.5	0.196173	1.99E-04	5.74E-03
3.75	0.152103	1.01E-04	6.07E-03	3.75	0.149989	1.01E-04	6.09E-03	3.75	0.152246	1.02E-04	6.07E-03
4	0.113463	6.77E-05	4.39E-03	4	0.111861	6.82E-05	4.40E-03	4	0.113565	6.71E-05	4.39E-03
4.25	9.16E-02	2.75E-05	3.87E-03	4.25	9.03E-02	2.75E-05	3.88E-03	4.25	9.17E-02	2.74E-05	3.87E-03
4.5	5.76E-02	5.17E-05	3.47E-03	4.5	5.67E-02	5.14E-05	3.48E-03	4.5	5.76E-02	5.18E-05	3.47E-03
4.75	5.22E-02	1.67E-05	2.60E-03	4.75	5.14E-02	1.69E-05	2.61E-03	4.75	5.22E-02	1.66E-05	2.60E-03
5	4.10E-02	4.75E-05	2.68E-03	5	4.04E-02	4.74E-05	2.69E-03	5	4.10E-02	4.74E-05	2.68E-03

Variasi 16			
Frekuensi (Hz)	Roll (deg/cm)	Pitch (deg/cm)	Heave (cm/cm)
1	1.279579	2.99E-02	1.231553
1.25	1.464783	1.05E-02	2.098153
1.5	1.461316	8.49E-04	0.98203
1.75	1.327728	2.12E-04	0.321944
2	1.145991	3.30E-04	0.113601
2.25	0.919679	3.74E-04	3.18E-02
2.5	0.647474	1.34E-04	1.65E-02
2.75	0.509735	8.68E-05	2.29E-03
3	0.39282	7.67E-05	2.90E-03
3.25	0.24125	7.53E-05	5.15E-03
3.5	0.193316	1.96E-04	5.75E-03
3.75	0.149989	1.01E-04	6.09E-03
4	0.111861	6.82E-05	4.40E-03
4.25	9.03E-02	2.75E-05	3.88E-03
4.5	5.67E-02	5.14E-05	3.48E-03
4.75	5.14E-02	1.69E-05	2.61E-03
5	4.04E-02	4.74E-05	2.69E-03

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Jakarta 22 Juli 1993. Penulis menempuh pendidikan di SMP N 49 Jakarta lulus tahun 2008 dan SMA N 14 Jakarta lulus tahun 2011. Pendidikan sarjana yang ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2012. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan HMTF di departemen PSDM selama periode 2013-2014. Selain aktif dalam berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Pengukuran Fisis selama periode 2014-2015 dan penulis juga aktif dalam mengikuti Program Kreativitas Mahasiswa. Bidang minat penulis adalah energi baru terbarukan, sistem pengukuran dan kalibrasi. Penulis dapat dihubungi di email *yuliasafitri2207@gmail.com*